

การฝังลายนํ้าของสัญญาณภาพดิจิทัลในโดเมนการบีบอัดโดยใช้การแปลง
มัลติเวฟเล็ต

นายทรงพล ดำนิล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2551

**DIGITAL IMAGE WATERMARKING IN COMPRESSED
DOMAIN USING MULTIWAVELET TRANSFORM**

Songphon Dumnin

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for
the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2008

การฝังลายน้ำของสัญญาณภาพดิจิทัลในโดเมนการบีบอัดโดยใช้การแปลงมัลติเวฟเล็ต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



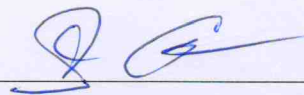
(ผศ. ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว)

ประธานกรรมการ



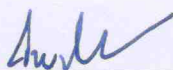
(รศ. ดร.กิตติ อรรถกิจมงคล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ร.อ. ดร.ประโชชน์ คำสวัสดิ์)

กรรมการ



(ศ. ดร.ไพโรจน์ สัตยธรรม)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ



(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ จำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ทรงพล คำนิล : การฝังลายน้ำของสัญญาณภาพดิจิทัลในโดเมนการบีบอัดโดยใช้การแปลงมัลติเวฟเลต (DIGITAL IMAGE WATERMARKING IN COMPRESSED DOMAIN USING MULTI WAVELET TRANSFORM) อาจารย์ที่ปรึกษา :
รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติ อรรถกิจมงคล, 145 หน้า

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ภาพดิจิทัลได้ถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางเพราะว่ามีความง่ายในการจัดเก็บ ส่งข้อมูลและการแก้ไข ซึ่งในอดีตที่ผ่านมาได้มีการวิจัยและพัฒนาวิธีการประมวลผลสัญญาณภาพที่สำคัญ คือ การบีบอัดสัญญาณภาพและการฝังลายน้ำดิจิทัล เมื่อพิจารณาถึงโครงสร้างของอัลกอริทึมทั้งสองจะเห็นว่ามีความเกี่ยวข้องกันบางอย่างที่เหมือนกัน ดังนั้น จึงได้ศึกษาและคิดค้นวิธีการที่จะรวมกระบวนการบีบอัดสัญญาณภาพและการฝังลายน้ำเข้าด้วยกัน วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการวิจัยและพัฒนาวิธีการฝังลายน้ำในโดเมนการบีบอัดเพื่อให้ได้ประโยชน์ทั้งในด้านการลดขนาดของข้อมูลและการป้องกันการละเมิดลิขสิทธิ์ โดยทำการศึกษาผลของการแปลงสัญญาณภาพต่ออัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณภาพและการฝังลายน้ำ ซึ่งประกอบด้วย การแปลงเวฟเลตและการแปลงมัลติเวฟเลต จากนั้นได้นำเสนออัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำโดยใช้การแปลงมัลติเวฟเลต เทคนิคการฝังลายน้ำที่นำเสนอจะถูกรวมเข้ากับอัลกอริทึมการเข้ารหัส SPIHT สำหรับพารามิเตอร์ของการฝังลายน้ำได้จากการค้นหาค่าเหมาะสมเพื่อหาจุดสมดุลระหว่างคุณภาพของภาพหลังการบีบอัดพร้อมกับฝังลายน้ำและความทนทานของสัญญาณลายน้ำโดยใช้การค้นหาค่าแบบตามูเชิงปรับตัวและจินเนติกอัลกอริทึม รูปแบบการฝังลายน้ำที่นำเสนอไม่ต้องใช้ภาพต้นแบบในขั้นตอนการคัดแยกลายน้ำ ในการวัดประสิทธิภาพของอัลกอริทึมจะใช้ค่า $PSNR$ เพื่อชี้วัดคุณภาพของภาพและค่า $normalized\ correlation$ หรือค่าอัตราความผิดพลาดบิตในการวัดความทนทานของสัญญาณลายน้ำ นอกจากนี้ยังได้ทำการเปรียบเทียบผลของการแปลงสัญญาณภาพระหว่างการแปลงเวฟเลตและการแปลงมัลติเวฟเลตกับอัลกอริทึมที่นำเสนอโดยพิจารณาถึงคุณภาพของภาพและความทนทานของสัญญาณลายน้ำที่อัตราบิตเดียวกัน

SONGPHON DUMNIN : DIGITAL IMAGE WATERMARKING IN
COMPRESSED DOMAIN USING MULTIWAVELET TRANSFORM.

THESIS AVISOR : ASSOC. PROF. KITTI ATTAKITMONGCOL, Ph.D.
145 PP.

IMAGE COMPRESSION/WATERMARKING/MULTIWAVELET/WAVELET/
ADAPTIVE TABU SEARCH/GENETIC ALGORITHM/COMPRESSED DOMAIN

In recent decade, digital images are widely used because they can be easily stored, transmitted and modified. It has been shown from the past research that two of the important image processing applications that have been widely investigated are image compression and image watermarking. Since both image processing applications have some steps in common, we have studied the way to integrate both algorithm so that compression and watermarking can be performed on an image simultaneously. This thesis presents the research and development of image watermarking in compressed domain. First, we study the effects of image transformations which are the discrete wavelet transform and the discrete multiwavelet transform to a combining compression and watermarking algorithm. Second, we propose an algorithm to integrate digital image watermarking to the existing SPIHT image compression. In our proposed method, we search for the optimal embedding parameters to make a trade off between quality of compressed watermarked image and robustness of watermark by using the adaptive tabu search and genetic algorithm. Furthermore, this method does not require the original image in the watermark extraction process. The peak signal to noise ratio and normalized correlation (or bit error rate) are used to evaluate the performance of the algorithm. Finally, the

performance of proposed algorithm is compared with the one using the discrete wavelet transform in the term of image quality and robustness of watermark.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2008

Student's Signature Songphon Dumnin

Advisor's Signature Kitti

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ รวมทั้งได้ให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและการดำเนินการวิจัย อันได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติ อรรถกิจมงคล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่ทุ่มเทให้กับลูกศิษย์ทุกคนและเป็นผู้เปิดโอกาสในการศึกษาให้กับผู้วิจัย คอยให้คำปรึกษา แนะนำ ให้กำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตให้กับผู้วิจัยเสมอมา รวมทั้งช่วยเหลือเวลาอันมีค่าตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนทำให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ช่วยให้ความรู้ ชี้แนะ และให้คำปรึกษาที่มีค่าเพื่อใช้ในการงานวิจัยนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ที่ช่วยเหลือเวลาอันมีค่าให้คำปรึกษา เพื่อเป็นแนวทางในการดำเนินการวิจัย

คณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีทุกท่านที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และให้ความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ ครูบาอาจารย์ทุกท่านในอดีตที่ผ่านมาที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้แขนงต่าง ๆ ให้แก่ผู้วิจัย

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่มอบโอกาสทางการศึกษาด้วยการสนับสนุนทุนการศึกษาสำหรับผู้มีศักยภาพเข้าศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา

ขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่คอยถามไถ่และให้กำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อคมสันต์และคุณแม่เหลือง ดำนิล ผู้ที่ไม่เคยบ่นว่าเหน็ดเหนื่อย ไม่เคยเอ่ยว่าลำบาก คอยอบรมเลี้ยงดูและมอบทุกสิ่งทุกอย่างให้แก่ลูก ๆ ทุกคนตลอดมา รวมถึงคุณสุชล ดำนิล น้องชายที่แสนดีและครอบครัวดำนิลทุกคนที่คอยให้ความรัก ความอบอุ่น ความหวังใจและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยต่อสู้กับอุปสรรคในยามที่ท้อถอยจนประสบความสำเร็จเรื่อยมาและตลอดไป

ทรงพล ดำนิล

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	๓
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ค
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของเบื้องต้น	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์	4
2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 กล่าวนำ.....	6
2.2 ประเภทของการฝังลายน้ำดิจิทัล	7
2.3 การฝังลายน้ำดิจิทัลในโดเมนการแปลง	7
2.3.1 การฝังลายน้ำดิจิทัลในโดเมนการแปลงดีสครีตโคไซน์	7
2.3.2 การฝังลายน้ำในโดเมนการแปลงเวฟเล็ต	8
2.3.3 การฝังลายน้ำในโดเมนการแปลงมัลติเวฟเล็ต.....	8
2.4 การฝังลายน้ำในโดเมนการบีบอัด	9
2.5 วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์กับการฝังลายน้ำดิจิทัล	11
2.6 สรุป.....	12

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3 ทฤษฎีเบื้องต้น	14
3.1 กล่าวนำ	14
3.2 การแปลงมัลติเวฟเลต	14
3.3 หลักการบีบอัดสัญญาณภาพเบื้องต้น	20
3.3.1 การบีบอัดสัญญาณภาพแบบไม่มีการสูญเสีย	23
3.3.2 การบีบอัดสัญญาณภาพแบบมีการสูญเสีย	24
3.4 การสร้างสัญญาณลายน้ำดิจิทัล	27
3.4.1 โครงสร้างของการฝังและการถอดสัญญาณลายน้ำ	27
3.4.2 ชนิดของสัญญาณลายน้ำดิจิทัล	28
3.4.3 ความต้องการของการฝังลายน้ำดิจิทัล	29
3.5 การบีบอัดสัญญาณภาพแบบ Set Partitioning in Hierarchical Tree	30
3.5.1 ความสัมพันธ์แบบ Spatial Orientation Trees	30
3.5.2 อัลกอริทึมการเข้ารหัส	32
3.5.3 อัลกอริทึมการถอดรหัส	35
3.6 การวัดประสิทธิภาพของการบีบอัดสัญญาณภาพและการฝังลายน้ำดิจิทัล	37
3.6.1 การวัดเชิงปริมาณ	37
3.6.2 การวัดเชิงคุณภาพ	40
3.7 วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์	40
3.7.1 จินเนตริกอัลกอริทึม	41
3.7.2 การค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว	45
3.8 สรุป	47
4 ผลของการแปลงสัญญาณภาพต่ออัลกอริทึม การบีบอัดสัญญาณภาพและการฝังลายน้ำ	48
4.1 กล่าวนำ	48
4.2 การบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำ	48
4.2.1 วิธีการแปลงสัญญาณภาพ	50

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.2	รูปแบบการบีบอัดสัญญาณภาพที่ใช้ในการทดสอบ	51
4.2.3	อัลกอริทึมการฝังลายน้ำ.....	51
4.2.4	การคัดแยกลายน้ำ.....	52
4.3	ผลการทดสอบ	53
4.4	สรุป.....	60
5	การฝังลายน้ำในโดเมนการบีบอัด.....	61
5.1	กล่าวนำ.....	61
5.2	วิธีการที่นำเสนอ	61
5.2.1	การเตรียมสัญญาณภาพและสัญญาณลายน้ำ.....	62
5.2.2	ขั้นตอนการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำ.....	62
5.2.3	ขั้นตอนการคัดแยกลายน้ำ.....	66
5.3	การค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการฝังลายน้ำ	69
5.3.1	ฟังก์ชันวัตถุประสงค์.....	70
5.3.2	การค้นหาค่าพารามิเตอร์ด้วย GA.....	71
5.3.3	การค้นหาค่าพารามิเตอร์ด้วย ATS.....	72
5.4	สรุป.....	74
6	ผลการทดสอบ	75
6.1	กล่าวนำ.....	75
6.2	ผลการทดสอบของอัลกอริทึมที่นำเสนอ.....	75
6.2.1	คุณภาพของภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำ.....	75
6.2.2	ความทนทานของสัญญาณลายน้ำ.....	78
6.3	เปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างอัลกอริทึมที่ใช้การแปลง มัลติเวฟเล็ตและการแปลงเวฟเล็ต.....	85
6.3.1	เปรียบเทียบผลการทดสอบของภาพหลังการบีบอัด และฝังลายน้ำที่อัตราบิต 0.5 bpp.....	85

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.3.2 เปรียบเทียบผลการทดสอบของภาพหลังการบีบอัด และฝังลายน้ำที่อัตราบิต 0.8 bpp.....	93
6.4 สรุป.....	100
7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	101
7.1 สรุปผลการวิจัย	101
7.2 ข้อเสนอแนะ	103
รายการอ้างอิง	104
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ภาพตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ	108
ภาคผนวก ข. ค่าพารามิเตอร์ของการฝังลายน้ำของภาพทดสอบต่าง ๆ ที่ได้จากการค้นหาด้วยจินเนติกอัลกอริทึมและการค้นหา แบบตามเชิงปรับตัว.....	113
ภาคผนวก ค. ผลการทดสอบของอัลกอริทึมที่นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ โดยเข้ารหัส SPIHT ที่อัตราบิตเท่ากับ 1.0 bpp	123
ภาคผนวก ง. เปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างอัลกอริทึมที่ใช้การแปลง มัลติเวฟเลตและการแปลงเวฟเลตโดยใช้การค้นหาพารามิเตอร์ ด้วย GA ที่อัตราบิต 0.5 bpp และ 0.8 bpp	131
ภาคผนวก จ. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	143
ประวัติผู้เขียน	145

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1	คุณภาพของภาพวัดโดยใช้ค่า $PSNR$ (dB)..... 54
4.2	ลายน้ำที่ถูกคัดแยกและค่า BER จากอัลกอริทึมที่ใช้ DWT หลังถูกโจมตีด้วยการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG 55
4.3	ลายน้ำที่ถูกคัดแยกและค่า BER จากอัลกอริทึมที่ใช้ DMT หลังถูกโจมตีด้วยการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG 55
4.4	ลายน้ำที่ถูกคัดแยกและค่า BER จากอัลกอริทึมที่ใช้ DWT หลังถูกโจมตีด้วยการกรองชนิดต่าง ๆ ขนาด 3×3 57
4.5	ลายน้ำที่ถูกคัดแยกและค่า BER จากอัลกอริทึมที่ใช้ DMT หลังถูกโจมตีด้วยการกรองชนิดต่าง ๆ ขนาด 3×3 58
4.6	ลายน้ำที่ถูกคัดแยกและค่า BER จากอัลกอริทึมที่ใช้ DWT หลังถูกโจมตีด้วยการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน 59
4.7	ลายน้ำที่ถูกคัดแยกและค่า BER จากอัลกอริทึมที่ใช้ DMT หลังถูกโจมตี ด้วยการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน 59
5.1	ค่าตัวประกอบการถ่วงน้ำหนักของการแปลงเวฟเลต 70
6.1	คุณภาพของภาพวัดโดยใช้ค่า $PSNR$ (dB) ที่อัตราบิต 0.3 bpp 76
6.2	คุณภาพของภาพวัดโดยใช้ค่า QI ที่อัตราบิต 0.3 bpp 77
6.3	ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำที่อัตราบิต 0.3 bpp หลังการถูกโจมตี ด้วยการกรองแบบค่ามัธยฐาน 79
6.4	ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำที่อัตราบิต 0.3 bpp หลังการถูกโจมตี ด้วยการกรองแบบต่ำผ่าน 80
6.5	ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำที่อัตราบิต 0.3 bpp หลังการถูกโจมตี ด้วยการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน 82
6.6	ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำที่อัตราบิต 0.3 bpp หลังการถูกโจมตี ด้วยการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG..... 83
6.7	คุณภาพของภาพวัดโดยใช้ค่า $PSNR$ (dB) ที่อัตราบิต 0.5 bpp 86

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6.8	คุณภาพของภาพวัดโดยใช้ค่า QI ที่อัตราบิต 0.5 bpp..... 86
6.9	ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DMT ที่อัตราบิต 0.5 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการกรองแบบค่ามัธยฐาน 89
6.10	ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DWT ที่อัตราบิต 0.5 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการกรองแบบค่ามัธยฐาน 89
6.11	ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DMT ที่อัตราบิต 0.5 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการกรองแบบค่าผ่าน 90
6.12	ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DWT ที่อัตราบิต 0.5 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการกรองแบบค่าผ่าน 90
6.13	ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DMT ที่อัตราบิต 0.5 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน 91
6.14	ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DWT ที่อัตราบิต 0.5 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน 91
6.15	ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DMT ที่อัตราบิต 0.5 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG 92
6.16	ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DWT ที่อัตราบิต 0.5 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG 92
6.17	คุณภาพของภาพวัดโดยใช้ค่า $PSNR$ (dB) ที่อัตราบิต 0.8 bpp..... 93
6.18	คุณภาพของภาพวัดโดยใช้ค่า QI ที่อัตราบิต 0.8 bpp..... 93
6.19	ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DMT ที่อัตราบิต 0.8 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการกรองแบบค่ามัธยฐาน 96
6.20	ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DWT ที่อัตราบิต 0.8 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการกรองแบบค่ามัธยฐาน 96
6.21	ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DMT ที่อัตราบิต 0.8 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการกรองแบบค่าผ่าน 97

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6.22 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DWT ที่อัตราบิต 0.8 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการกรอแบบต่ำผ่าน	97
6.23 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DMT ที่อัตราบิต 0.8 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน	98
6.24 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DWT ที่อัตราบิต 0.8 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน	98
6.25 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DMT ที่อัตราบิต 0.8 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG	99
6.26 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DWT ที่อัตราบิต 0.8 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG	99
ข.1 ค่าพารามิเตอร์ของการฝังลายน้ำของภาพทดสอบต่าง ๆ โดยใช้ ATS และการแปลง DMT	115
ข.2 ค่าพารามิเตอร์ของการฝังลายน้ำของภาพทดสอบต่าง ๆ โดยใช้ GA และการแปลง DMT	117
ข.3 ค่าพารามิเตอร์ของการฝังลายน้ำของภาพทดสอบต่าง ๆ โดยใช้ ATS และการแปลง DWT	119
ข.4 ค่าพารามิเตอร์ของการฝังลายน้ำของภาพทดสอบต่าง ๆ โดยใช้ GA และการแปลง DWT	121
ค.1 คุณภาพของภาพวัดโดยใช้ค่า $PSNR$ (dB) ที่อัตราบิต 1.0 bpp	125
ค.2 คุณภาพของภาพวัดโดยใช้ค่า QI ที่อัตราบิต 1.0 bpp	126
ค.3 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำที่อัตราบิต 1.0 bpp หลังการถูกโจมตี ด้วยการกรอแบบค่ามัธยฐาน	127
ค.4 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำที่อัตราบิต 1.0 bpp หลังการถูกโจมตี ด้วยการกรอแบบต่ำผ่าน	128
ค.5 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำที่อัตราบิต 1.0 bpp หลังการถูกโจมตี ด้วยการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน	129

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.6 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำที่อัตราบิต 1.0 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG.....	130
ง.1 คุณภาพของภาพวัดโดยใช้ค่า $PSNR$ (dB) ที่อัตราบิต 0.5 bpp	133
ง.2 คุณภาพของภาพวัดโดยใช้ค่า QI ที่อัตราบิต 0.5 bpp.....	133
ง.3 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DMT ที่อัตราบิต 0.5 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการกรองแบบค่ามัธยฐาน	134
ง.4 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DWT ที่อัตราบิต 0.5 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการกรองแบบค่ามัธยฐาน	134
ง.5 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DMT ที่อัตราบิต 0.5 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการกรองแบบค่าผ่าน	135
ง.6 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DWT ที่อัตราบิต 0.5 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการกรองแบบค่าผ่าน	135
ง.7 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DMT ที่อัตราบิต 0.5 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน	136
ง.8 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DWT ที่อัตราบิต 0.5 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน	136
ง.9 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DMT ที่อัตราบิต 0.5 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG	137
ง.10 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DWT ที่อัตราบิต 0.5 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG	137
ง.11 คุณภาพของภาพวัดโดยใช้ค่า $PSNR$ (dB) ที่อัตราบิต 0.8 bpp	138
ง.12 คุณภาพของภาพวัดโดยใช้ค่า QI ที่อัตราบิต 0.8 bpp.....	138
ง.13 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DMT ที่อัตราบิต 0.8 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการกรองแบบค่ามัธยฐาน	139
ง.14 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DWT ที่อัตราบิต 0.8 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการกรองแบบค่ามัธยฐาน	139

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ง.15 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DMT ที่อัตราบิต 0.8 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการกรองแบบต่ำผ่าน	140
ง.16 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DWT ที่อัตราบิต 0.8 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการกรองแบบต่ำผ่าน	140
ง.17 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DMT ที่อัตราบิต 0.8 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน	141
ง.18 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DWT ที่อัตราบิต 0.8 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน	141
ง.19 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DMT ที่อัตราบิต 0.8 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG	142
ง.20 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DWT ที่อัตราบิต 0.8 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG	142

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	แผนภาพอัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณและฟังกายน้ำ..... 3
1.2	ภาพลายน้ำที่ใช้ในการทดสอบ 3
3.1	ฟิลเตอร์เบงก์ของมัลติเวฟเล็ดใน 1 มิติ..... 16
3.2	การแปลงเวฟเล็ด 1 ระดับ 19
3.3	การแปลงมัลติเวฟเล็ด 1 ระดับและจัดเรียงสัมประสิทธิ์แบบต่าง ๆ..... 19
3.4	ภาพ Lena หลังการแปลงมัลติเวฟเล็ด 3 ระดับ และจัดเรียงสัมประสิทธิ์ทั้งสองแบบ 20
3.5	รูปแบบการเข้ารหัสและถอดรหัส CODEC 21
3.6	ประเภทของการบีบอัดสัญญาณภาพ 22
3.7	ขั้นตอนการบีบอัดสัญญาณภาพโดยใช้การแปลงมัลติเวฟเล็ด..... 26
3.8	การสร้างสัญญาณลายน้ำและการถอดสัญญาณลายน้ำ 28
3.9	ความสัมพันธ์แบบ spatial orientation tree 31
3.10	ตำแหน่งการสืบทอดของ spatial orientation 32
3.11	ขั้นตอนของกระบวนการ Sorting Pass..... 36
3.12	ขั้นตอนของกระบวนการ Refinement Pass..... 36
3.13	แผนภาพวัฏจักรของ GA 42
3.14	การเชื่อมต่อกันระหว่าง GA กับระบบ..... 42
3.15	ขั้นตอนการทำงานของ GA 44
3.16	แผนผังการทำงานของ ATS..... 46
4.1	โดเมนของการฟังกายน้ำ..... 49
4.2	ภาพแบนด์ย่อยจากการแยกองค์ประกอบเวฟเล็ด 3 ระดับ 50
4.3	ภาพแบนด์ย่อยจากการแยกองค์ประกอบมัลติเวฟเล็ด 3 ระดับ 51
4.4	แผนภาพขั้นตอนการเข้ารหัสและฟังกายน้ำ..... 52
4.5	แผนภาพขั้นตอนการตรวจจับลายน้ำ..... 53
4.6	ภาพสัญญาณลายน้ำแบบขาคำ..... 54

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 ภาพ “Lena” หลังการบีบอัดและฝังลายน้ำโดยใช้ (ก) DWT (ข) DMT	56
4.8 ภาพ “Boat” หลังการบีบอัดและฝังลายน้ำโดยใช้ (ก) DWT (ข) DMT	56
4.9 ภาพ “Barbara” หลังการบีบอัดและฝังลายน้ำโดยใช้ (ก) DWT (ข) DMT	57
4.10 ภาพที่ฝังลายน้ำหลังการถูกโจมตีแบบต่าง ๆ	58
5.1 การเตรียมสัญญาณลายน้ำ.....	62
5.2 แผนภาพกระบวนการฝังลายน้ำ.....	64
5.3 แผนผังกระบวนการเข้ารหัสและฝังลายน้ำของวิธีการที่นำเสนอ	65
5.4 แผนผังกระบวนการสร้างกลับภาพหลังถูกบีบอัดและฝังลายน้ำ	66
5.5 แผนภาพกระบวนการคัดแยกลายน้ำ	67
5.6 แผนผังอัลกอริทึมการคัดแยกลายน้ำ	68
5.7 แผนภาพการหาค่าพารามิเตอร์ของการฝังลายน้ำด้วย GA และ ATS.....	69
5.8 แผนภาพการค้นหาค่าพารามิเตอร์ด้วย GA.....	72
5.9 แผนภาพการค้นหาค่าพารามิเตอร์ด้วย ATS	73
6.1 (ก) ภาพต้นแบบ (ข) ภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำที่อัตราบิต 0.3 bpp	76
6.2 (ก) ภาพต้นแบบ (ข) ภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำที่อัตราบิต 0.3 bpp	77
6.3 ค่า BER ของภาพทดสอบหลังการโจมตีด้วยการกรอแบบค่ามาตรฐาน ที่ขนาดตัวกรองเท่ากับ 5×5	81
6.4 ค่า BER ของภาพทดสอบหลังการโจมตีด้วยการกรอแบบต่ำผ่าน ที่ขนาดตัวกรองเท่ากับ 5×5	81
6.5 ค่า BER ของภาพทดสอบหลังการโจมตีด้วยการเพิ่มสัญญาณรบกวน แบบเกาส์เซียนที่ค่าความแปรปรวนเท่ากับ 100.....	84
6.6 ค่า BER ของภาพทดสอบหลังการโจมตีด้วยการบีบอัดสัญญาณภาพ แบบ JPEG (Q.F. = 10).....	84
6.7 ภาพ “Barbara” หลังการบีบอัดและฝังลายน้ำจากการค้นหาด้วย ATS ที่อัตราบิต 0.5 bpp โดยใช้ (ก) DMT (ข) DWT	87

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.8 ขนาดผลต่างของภาพต้นแบบกับภาพหลังการบีบอัดและฟังกายน้ำ ของภาพ “Barbara” ที่อัตราบิต 0.5 bpp ปรับคูณด้วย 6	87
6.9 ภาพ “Lena” หลังการบีบอัดและฟังกายน้ำจากการค้นหาด้วย ATS ที่อัตราบิต 0.5 bpp โดยใช้ (ก) DMT (ข) DWT	88
6.10 ขนาดผลต่างของภาพต้นแบบกับภาพหลังการบีบอัดและฟังกายน้ำ ของภาพ “Lena” ที่อัตราบิต 0.5 bpp ปรับคูณด้วย 11	88
6.11 ภาพ “Barbara” หลังการบีบอัดและฟังกายน้ำจากการค้นหาด้วย ATS ที่อัตราบิต 0.8 bpp โดยใช้ (ก) DMT (ข) DWT	94
6.12 ขนาดผลต่างของภาพต้นแบบกับภาพหลังการบีบอัดและฟังกายน้ำ ของภาพ “Barbara” ที่อัตราบิต 0.8 bpp ปรับคูณด้วย 6	94
6.13 ภาพ “Lena” หลังการบีบอัดและฟังกายน้ำจากการค้นหาด้วย ATS ที่อัตราบิต 0.8 bpp โดยใช้ (ก) DMT (ข) DWT	95
6.14 ขนาดผลต่างของภาพต้นแบบกับภาพหลังการบีบอัดและฟังกายน้ำ ของภาพ “Lena” ที่อัตราบิต 0.8 bpp ปรับคูณด้วย 11	95
ก.1 ภาพ Baboon	109
ก.2 ภาพ Barbara	110
ก.3 ภาพ Boat	110
ก.4 ภาพ Goldhill	111
ก.5 ภาพ Lena	111
ก.6 ภาพ Peppers	112
ค.1 (ก) ภาพต้นแบบ (ข) ภาพหลังการบีบอัดและฟังกายน้ำที่อัตราบิต 1.0 bpp	125
ค.2 (ก) ภาพต้นแบบ (ข) ภาพหลังการบีบอัดและฟังกายน้ำที่อัตราบิต 1.0 bpp	126

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

c	สัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดหรือมัลติเวฟเล็ด
c'	สัมประสิทธิ์การแปลงหลังการฟุ้งลายน้ำ
c'_w	สัมประสิทธิ์การแปลงของภาพต้องสงสัย
c_0	สัมประสิทธิ์หลังผ่านตัวกรองก่อน
c_1	สัมประสิทธิ์ความถี่ต่ำของการแปลงมัลติเวฟเล็ดใน 1 ระดับ
d_1	สัมประสิทธิ์ความถี่สูงของการแปลงมัลติเวฟเล็ดใน 1 ระดับ
$D(i, j)$	เซตของตำแหน่งการสืบทอดทั้งหมด
D_r	ตัวดำเนินการจัดเรียงลำดับสเกลาร์เป็นลำดับแบบกลุ่มที่มีความยาวเวกเตอร์เท่ากับ r
f	ฟังก์ชันวัตถุประสงค์
$g(k)$	สัมประสิทธิ์ตัวกรองความถี่สูง
$G(z)$	การแปลงแซดของ $g(k)$
$h(k)$	สัมประสิทธิ์ตัวกรองความถี่ต่ำ
H	เซตของตำแหน่งโน้ตในแบนด์ย่อยสูงสุด
$H(z)$	การแปลงแซดของ $h(k)$
HH_1	แบนด์ย่อยของสัญญาณที่ผ่านตัวกรองความถี่สูงและตัวกรองความถี่สูง จากการแยกองค์ประกอบ 1 ระดับ
HL_1	แบนด์ย่อยของสัญญาณที่ผ่านตัวกรองความถี่สูงและตัวกรองความถี่ต่ำ จากการแยกองค์ประกอบ 1 ระดับ
I	ภาพต้นแบบ
I_w	ภาพที่ถูกบีบอัดและฟุ้งลายน้ำ
I'_w	ภาพต้องสงสัย
$L(i, j)$	เซตของตำแหน่งการสืบทอดทั้งหมดยกเว้นการสืบทอด offspring
LH_1	แบนด์ย่อยของสัญญาณที่ผ่านตัวกรองความถี่ต่ำและตัวกรองความถี่สูง จากการแยกองค์ประกอบ 1 ระดับ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

LL_1	แบนด์ย่อยของสัญญาณที่ผ่านตัวกรองความถี่ต่ำและตัวกรองความถี่ต่ำ จากการแยกองค์ประกอบ 1 ระดับ
m	ตัวประกอบการขยาย
M	ขนาดความกว้างของภาพ
M_1	ขนาดความกว้างของภาพลายน้ำ
n	อันดับของบิต
N	ขนาดความยาวของภาพ
N_1	ขนาดความยาวของภาพลายน้ำ
N_a	จำนวนของการโจมตี
$O(i, j)$	เซตของตำแหน่งการสืบทอด offspring
p	จำนวนของระดับการแปลงสัญญาณภาพ
$P(z)$	ตัวกรองหลัง
q_{ij}	ตัวประกอบควอนไทเซชัน
$Q(z)$	ตัวกรองก่อน
r	จำนวนของฟังก์ชันย่อ-ขยาย
$S_n(i, j)$	ค่าพิกเซลเดี่ยวของเซตนั้น ๆ ที่ตำแหน่ง (i, j)
T	ค่าขีดเริ่มเปลี่ยนของการเข้ารหัส
T_1	ค่าขีดเริ่มเปลี่ยนขอบเขตล่างของการเลือกสัมประสิทธิ์
T_2	ค่าขีดเริ่มเปลี่ยนขอบเขตบนของการเลือกสัมประสิทธิ์
T_w	ค่าขีดเริ่มเปลี่ยนของการฝังลายน้ำ
T'_w	ค่าขีดเริ่มเปลี่ยนของการคัดแยกลายน้ำ
V	ลำดับเวกเตอร์แบบสุ่ม
v_k	ลายน้ำลำดับเวกเตอร์แบบสุ่มบิตที่ k
w_{ij}	ตัวประกอบการถ่วงน้ำหนักของแต่ละแบนด์ย่อย
W	สัญญาณลายน้ำแบบภาพขาวดำ
W'	สัญญาณลายน้ำที่ได้จากการคัดแยก
x	ลำดับเวกเตอร์
Z	เซตของจำนวนเต็ม

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

α_1	ค่าความแรงของลายน้ำ เมื่อปิดลายน้ำเป็น 1
α_2	ค่าความแรงของลายน้ำ เมื่อปิดลายน้ำเป็น 0
$\phi(t)$	ฟังก์ชันย่อ-ขยาย
$\psi(t)$	ฟังก์ชันเวฟเลต
$\Phi(t)$	มัลติสเกลลิงฟังก์ชัน
$\Psi(t)$	ฟังก์ชันมัลติเวฟเลต
$\oplus$	ตัวดำเนินการ Exclusive OR
δ_{QI}	ตัวประกอบการถ่วงน้ำหนักของค่า QI
δ_{NC}	ตัวประกอบการถ่วงน้ำหนักของค่า NC
ADPCM	Adaptive Differential Pulse Code Modulation
ATS	Adaptive Tabu Search
BCR	Bit Correct Ratio
BER	Bit Error Rate
bpp	bit per pixel
CODEC	การเข้ารหัสและถอดรหัส
DCT	Discrete Cosine Transform
DFT	Discrete Fourier Transform
DGHM	Donovan, Geromino, Hardin and Massopust
DMT	Discrete Multiwavelet Transform
DPCM	Differential Pulse Code Modulation
DWT	Discrete Wavelet Transform
EE	Electrical Engineering
EZW	Embedded Zerotree Wavelet
GA	Genetic Algorithms
HVS	Human Visual System
JPEG	Joint Photographic Experts Group
LIP	List of Insignificant Pixel
LIS	List of Insignificant Sets
LSB	Least Significant Bit

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

LSP	List of Significant Pixel
LZW	Lempel Ziv-Welch
MRA	Multiresolution Analysis
<i>MSE</i>	Mean Square Error
MTWC	Multi-Threshold Wavelet Codec
<i>NC</i>	Normalized Cross-Correlation
<i>PSNR</i>	Peak Signal to Noise Ratio
Q.F.	JPEG Quality Factor
<i>QI</i>	ดัชนีชี้วัดคุณภาพของภาพ
RLE	Run Length Encoding
ROI	Region of Interest
SPIHT	Set Partitioning in Hierarchical Trees

บทที่ 1

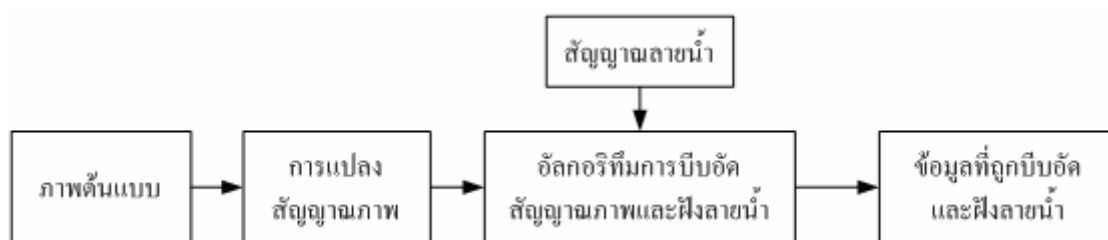
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ได้มีการนำข้อมูลดิจิทัลเข้ามาใช้กันอย่างแพร่หลายผ่านทางช่องทางต่าง ๆ เช่น ระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์ อินเทอร์เน็ต โทรศัพท์มือถือ กล้องถ่ายรูป เป็นต้น ซึ่งจะทำให้เกือบจะเป็นส่วนหนึ่งของชีวิตประจำวัน ข้อมูลดิจิทัลที่ใช้งานกันก็มีหลายประเภทเช่นกัน ข้อมูลดิจิทัลที่เป็นที่นิยมอย่างหนึ่ง คือ รูปภาพดิจิทัล เนื่องจากปัจจุบันเทคโนโลยีของอุปกรณ์ที่ใช้ถ่ายภาพได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็ว ทำให้บุคคลทั่วไปสามารถที่จะถ่ายภาพได้อย่างง่ายดาย นอกจากนี้ยังปรับปรุงให้มีความสะดวกมากยิ่งขึ้นด้วยฟังก์ชันการใช้งานต่าง ๆ และยังสามารถใช้งานร่วมกับอุปกรณ์อื่น ๆ ได้อีกด้วย ไม่ว่าจะเป็นในโทรศัพท์มือถือ คอมพิวเตอร์ ส่วนบุคคล คอมพิวเตอร์พกพา ภาพดิจิทัลมีข้อดี คือ สามารถถ่ายโอน จัดเก็บ จัดแปลงและคัดลอกได้ง่ายทำให้ได้รับความนิยมอย่างรวดเร็วและแพร่หลาย เนื่องจากภาพดิจิทัลสามารถที่จะนำไปใช้ผ่านระบบเครือข่ายได้ จึงทำให้เกิดปัญหาของการละเมิดลิขสิทธิ์ ไม่สามารถที่จะอ้างสิทธิ์ความเป็นเจ้าของได้ ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญของอุตสาหกรรมทางด้านภาพถ่าย วิธีการหนึ่งที่นิยมใช้ในการป้องกันการละเมิดลิขสิทธิ์ของภาพดิจิทัลคือ การฝังลายน้ำดิจิทัล ซึ่งเป็นการใส่รหัสเฉพาะเข้าไปในภาพ โดยผู้ที่คัดลอกภาพไปจะไม่ทราบว่ามียาลายน้ำอยู่ในภาพ และเมื่อต้องการระบุความเป็นเจ้าของก็ต้องทำการคัดแยกลายน้ำนั้นออกมาด้วยรหัสลับที่เจ้าของภาพได้ใช้ในขั้นตอนการฝังลายน้ำ สำหรับสัญญาณลายน้ำที่ทำการฝังเข้าไปนั้นจะต้องไม่ทำให้ภาพที่ถูกฝังลายน้ำเกิดความผิดเพี้ยนไปจากภาพต้นแบบมากนัก กล่าวคือ คุณภาพของภาพหลังการฝังลายน้ำจะต้องไม่ลดลงต่ำมากจนเกินไปซึ่งจะทำให้ภาพที่ได้นั้นไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน นอกจากนี้สัญญาณลายน้ำควรจะสามารถคัดแยกได้ง่ายสำหรับผู้ที่เป็นเจ้าของ มีความน่าเชื่อถือและมีความทนทานต่อการถูกโจมตีจากการบีบอัดสัญญาณภาพ การประมวลผลภาพพื้นฐานต่าง ๆ จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการฝังลายน้ำในโดเมนการแปลงจะให้ความทนทานของสัญญาณลายน้ำดีกว่าในโดเมนเวลา ซึ่งการแปลงสัญญาณภาพที่นิยมใช้กัน เช่น การแปลงดิสครีตโคไซน์ การแปลงฟูริเยร์ และการแปลงเวฟเลต เป็นต้น

นอกจากนี้ข้อมูลดิจิทัลส่วนใหญ่ที่ใช้งานกันในปัจจุบันจะใช้ผ่านทางระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์และอินเทอร์เน็ตในการรับส่งข้อมูล ถ้าข้อมูลที้นำมาใช้เป็นข้อมูลที่มีขนาดใหญ่จะทำให้ต้องใช้เวลาในการรับส่งข้อมูลมาก ดังนั้นจึงต้องมีการลดขนาดของข้อมูลก่อนที่จะทำการรับส่งข้อมูล ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้อัลกอริทึมการบีบอัดข้อมูลดิจิทัลต่าง ๆ จึงทำให้มีความรวดเร็วมากยิ่งขึ้น และเมื่อการบีบอัดข้อมูลช่วยลดขนาดของข้อมูลลงก็จะทำให้เกิดประโยชน์อีกอย่าง คือ ช่วยประหยัดพื้นที่ในการจัดเก็บข้อมูล เช่น ข้อมูลภาพสีที่ยังไม่ผ่านการบีบอัด ขนาด 1024×1024 จะต้องใช้พื้นที่ในการจัดเก็บประมาณ 3 MB เป็นต้น ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองพื้นที่ในการจัดเก็บมากและสร้างปัญหาให้กับการใช้งานบางประเภท เช่น ภาพถ่ายทางการแพทย์ซึ่งมีผู้ใช้บริการจำนวนมากในแต่ละวัน ภาพถ่ายดาวเทียม เป็นต้น การบีบอัดสัญญาณภาพแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก คือ การบีบอัดสัญญาณภาพแบบไม่มีการสูญเสียและการบีบอัดสัญญาณภาพแบบมีการสูญเสีย ซึ่งก็มีการนำไปใช้งานในด้านต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน โดยการบีบอัดสัญญาณภาพแบบไม่มีการสูญเสียนั้นจะส่วนใหญ่จะนำไปใช้งานที่ต้องการความละเอียดของภาพสูง แต่ที่เป็นที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปเป็นการบีบอัดสัญญาณภาพแบบมีการสูญเสีย เนื่องจากสามารถที่จะลดขนาดของข้อมูลภาพได้มากกว่าโดยการยอมให้เกิดการหายไปของข้อมูลได้แต่จะไม่สามารถสังเกตเห็นหรือภาพมีความแตกต่างกับภาพต้นแบบน้อยมาก ซึ่งการบีบอัดสัญญาณภาพแบบนี้ก็สามารถแบ่งย่อยได้หลายประเภทเช่นกัน แต่ที่ให้ผลการทดสอบที่ดีจะต้องมีการแปลงสัญญาณภาพก่อนเพื่อช่วยลดการสูญเสีย โดยการบีบอัดสัญญาณภาพที่ใช้กันเป็นมาตรฐานในปัจจุบัน คือ การบีบอัดสัญญาณภาพมาตรฐานแบบ JPEG ซึ่งจะใช้การแปลงโคไซน์ และได้พัฒนาต่อมาเป็นการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG2000 ซึ่งใช้การแปลงเวฟเลต นอกจากนี้ ในช่วงที่ผ่านมาได้มีการนำเอาการแปลงมัลติเวฟเลตมาใช้ในการบีบอัดสัญญาณภาพและยังได้รับความสนใจที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับด้านอื่น ๆ ด้วยเช่นกัน

จากที่กล่าวมาแล้วนั้นจะเห็นว่าการบีบอัดสัญญาณภาพและการสร้างลายน้ำดิจิทัลมีประโยชน์ต่อการนำข้อมูลภาพดิจิทัลไปใช้เป็นอย่างมาก ทั้งในด้านของการลดขนาดของข้อมูลพื้นที่ในการจัดเก็บและป้องกันการละเมิดลิขสิทธิ์อีกด้วย และเนื่องจากอัลกอริทึมทั้งสองมีกระบวนการบางส่วนที่เหมือนกันจึงสามารถรวมสองอัลกอริทึมนี้เข้าด้วยกันได้ ซึ่งจะช่วยลดความซับซ้อนของกระบวนการและลดเวลาในการดำเนินการลง แผนภาพการรวมอัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณภาพและการฝังลายน้ำเข้าด้วยกันแสดงดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แผนภาพอัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณและฝังลายน้ำ

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษา คิดค้น และพัฒนาอัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำโดยใช้การแปลงมัลติเวฟเลต ซึ่งจะทำให้ลดกระบวนการในการดำเนินงานลง และเพื่อใช้ประโยชน์ทั้งในด้านการลดขนาดของข้อมูลภาพและป้องกันการละเมิดลิขสิทธิ์

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1) ใช้ภาพทดสอบเป็นระดับเทา 8 bpp ขนาด 512×512
- 2) ใช้สัญญาณลายน้ำแบบภาพขาวดำ ขนาด 16×16 ดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 ภาพลายน้ำที่ใช้ในการทดสอบ

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) พัฒนาอัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำโดยใช้การแปลงมัลติเวฟเลต
- 2) พัฒนาโปรแกรมในการบีบอัดสัญญาณภาพและการสร้างสัญญาณลายน้ำดิจิทัลโดยใช้ภาษา C++
- 3) ทดสอบโปรแกรมกับภาพตัวอย่าง วัดคุณภาพของภาพและความคงทนของสัญญาณลายน้ำดิจิทัล
- 4) เปรียบเทียบผลการทดสอบที่ใช้การแปลงมัลติเวฟเลตกับการแปลงเวฟเลต

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้อัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณพร้อมกับการฝังลายน้ำโดยใช้การแปลงมัลติเวฟเล็ทเพื่อใช้ในการป้องกันการละเมิดลิขสิทธิ์
- 2) ได้ผลการวิจัยที่นำการแปลงมัลติเวฟเล็ทมาประยุกต์ใช้ เพื่อเป็นแนวทางในการดำเนินการวิจัยต่อไป
- 3) ได้โปรแกรมต้นแบบที่ได้พัฒนามาจากอัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำดิจิทัล
- 4) สามารถนำเอาวิธีการทางปัญญาระดับมาประยุกต์ใช้กับอัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำดิจิทัลได้

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบไปด้วยเนื้อหาทั้งหมด 7 บทและมีภาคผนวกทั้งสิ้น 3 ส่วน โดยในแต่ละบทมีรายละเอียดของเนื้อหา ดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัยและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงการปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ประเภทของการฝังลายน้ำ การฝังลายน้ำในโดเมนการแปลง การฝังลายน้ำในโดเมนการบีบอัดและการนำวิธีการทางปัญญาระดับมาใช้ในการฝังลายน้ำ

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ได้แก่ การแปลงมัลติเวฟเล็ท หลักการบีบอัดสัญญาณภาพเบื้องต้น การสร้างสัญญาณลายน้ำดิจิทัล การบีบอัดสัญญาณภาพแบบ SPIHT การวัดผลประสิทธิภาพของการบีบอัดสัญญาณภาพและฝังลายน้ำในด้านคุณภาพและความทนทาน และกล่าวถึงเทคนิคการค้นหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วย GA และ ATS

บทที่ 4 กล่าวถึงผลกระทบของการแปลงสัญญาณภาพต่ออัลกอริทึมการบีบอัดและฝังลายน้ำ ซึ่งประกอบไปด้วย การแปลงเวฟเล็ทและการแปลงมัลติเวฟเล็ท

บทที่ 5 นำเสนอวิธีการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำโดยใช้การแปลงมัลติเวฟเล็ท และอธิบายถึงกระบวนการในการประยุกต์ใช้ GA และ ATS ในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของการฝังลายน้ำที่เหมาะสมโดยใช้อัลกอริทึมการฝังลายน้ำในโดเมนการบีบอัดที่นำเสนอ

บทที่ 6 เป็นการแสดงผลการทดสอบคุณภาพของภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำ ความทนทานของสัญญาณลายน้ำหลังการถูกโจมตีแบบต่าง ๆ โดยใช้อัลกอริทึมที่นำเสนอ เปรียบเทียบผลการทดสอบกับการใช้การแปลงเวฟเล็ทและอภิปรายผล

บทที่ 7 เป็นการสรุปผลการทดสอบทั้งหมดในงานวิจัยและข้อเสนอแนะที่จะใช้ในการปรับปรุงแก้ไขเพิ่มเติมงานวิจัยให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นในอนาคต

ภาคผนวก ก. แสดงภาพที่ใช้ในการทดสอบ เป็นภาพระดับเทาที่ยังไม่ผ่านการบีบอัดขนาด 512×512 , 8 bpp

ภาคผนวก ข. แสดงค่าพารามิเตอร์ของการฝังลายน้ำที่ได้จากการค้นหาด้วย GA และ ATS ของภาพทดสอบที่อัตราบิตต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วย ค่าความแรงของลายน้ำและค่าขีดเริ่มเปลี่ยนในการคัดแยกลายน้ำ

ภาคผนวก ค. แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์โดยเข้ารหัส SPIHT ที่อัตราบิตเท่ากับ 1.0 bpp

ภาคผนวก ง. แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างอัลกอริทึมที่ใช้การแปลงมัลติเวฟเลตและการแปลงเวฟเลตโดยใช้การค้นหาพารามิเตอร์ด้วย GA ที่อัตราบิต 0.5 bpp และ 0.8 bpp

ภาคผนวก จ. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

ปัจจุบันข้อมูลที่อยู่ในรูปดิจิทัลกำลังได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลาย อาทิเช่น รูปภาพ เสียงพูด เพลง วิดีโอ เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากข้อมูลดิจิทัลเหล่านั้นมีวิธีการสร้าง การประมวลผล และการจัดเก็บที่สามารถทำได้ง่ายด้าย ทำให้บุคคลที่นำไปใช้มีความสะดวกสบายมากขึ้น ในขณะเดียวกันระบบการสื่อสารผ่านทางเครือข่ายดิจิทัลก็ได้มีการพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะทางด้านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต จึงทำให้มีเผยแพร่และคัดลอกภาพดิจิทัลกันได้อย่างง่ายด้ายเช่นกันและทำให้เกิดการละเมิดลิขสิทธิ์เกิดขึ้น วิธีการแก้ปัญหาอย่างหนึ่งคือ การฝังลายน้ำดิจิทัล เพื่อระบุความเป็นเจ้าของ นอกจากนี้สิ่งสำคัญอีกประการในการใช้ภาพดิจิทัลผ่านทางระบบเครือข่ายคือ ขนาดของข้อมูล ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อปัจจัยทางด้านพื้นที่ที่ใช้ในการจัดเก็บและเวลาในการส่งข้อมูล ดังนั้นจึงควรมีการบีบอัดสัญญาณภาพดิจิทัลด้วยเช่นกัน เมื่อพิจารณาถึงขั้นตอนของการฝังลายน้ำและการบีบอัดสัญญาณภาพจะเห็นว่ามีการบวนการบางอย่างที่เหมือนกัน จึงสามารถที่จะรวมกระบวนการทั้งสองเข้าด้วยกันได้ เพื่อให้ได้ประโยชน์ทั้งด้านการป้องกันการละเมิดลิขสิทธิ์และการลดขนาดของข้อมูล

ในบทนี้ได้กล่าวถึง งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการฝังลายน้ำดิจิทัล การรวมกระบวนการฝังลายน้ำและการบีบอัดสัญญาณภาพเข้าด้วยกัน และการประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์เพื่อหาค่าเหมาะสมที่สุด พบว่างานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอวิธีการฝังลายน้ำหลายรูปแบบ แบ่งตามโดเมนของการฝังลายน้ำคือ โดเมนเวลาและโดเมนการแปลง ซึ่งสัญญาณลายน้ำที่ได้จากการฝังในโดเมนการแปลงจะมีความทนทานกว่าโดเมนเวลา สำหรับการบีบอัดสัญญาณภาพที่เป็นที่นิยมนกันอย่างแพร่หลายคือ การบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG แต่มีขั้นตอนการบีบอัดที่ซับซ้อนมาก จึงได้มีการเสนอวิธีการโดยอาศัยความสัมพันธ์แบบซีโรทรี (zerotree) ซึ่งเป็นวิธีการที่ง่ายและมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังมีการนำวิธีการทางจินเนติกอัลกอริทึมและการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวมาใช้ในการฝังลายน้ำอีกด้วย เพื่อหาพารามิเตอร์ของการทำฝังลายน้ำที่ทำให้มีคุณภาพของภาพและสัญญาณลายน้ำมีความคงทนดีที่สุด ซึ่งจะนำเสนอในหัวข้อถัดไปคือ หัวข้อที่ 2.2

กล่าวถึงประเภทของการฝังลายน้ำดิจิทัล หัวข้อที่ 2.3 กล่าวถึงการฝังลายน้ำในโดเมนการแปลง หัวข้อที่ 2.4 กล่าวถึงการฝังลายน้ำในโดเมนการบีบอัด หัวข้อที่ 2.5 กล่าวถึงการนำวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์มาช่วยร่วมกับการฝังลายน้ำดิจิทัล และหัวข้อที่ 2.6 เป็นการสรุปของบทนี้

2.2 ประเภทของการฝังลายน้ำดิจิทัล

สัญญาณภาพดิจิทัลสามารถแสดงได้ในโดเมนเวลาโดยการแทนด้วยค่าพิกเซล และแสดงได้ในโดเมนความถี่ซึ่งจะแยกสัญญาณออกเป็นแบนด์ความถี่หลาย ๆ แบนด์ สำหรับการแปลงสัญญาณภาพที่นิยมใช้กัน เช่น การแปลงโคไซน์ดิสครีต (Discrete Cosine Transform, DCT) การแปลงฟูรีเยร์ดิสครีต (Discrete Fourier Transform, DFT) การแปลงเวฟเลตดิสครีต (Discrete Wavelet Transform, DWT) และการแปลงมัลติเวฟเลตดิสครีต (Discrete Multiwavelet Transform, DMT) เป็นต้น ซึ่งการแปลงแต่ละชนิดก็มีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน

การฝังลายน้ำดิจิทัลสามารถจำแนกได้หลายแบบ แต่ถ้าแบ่งตามโดเมนการฝังลายน้ำสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1) การฝังลายน้ำในโดเมนเวลา เป็นวิธีการฝังลายน้ำที่ง่ายและไม่ยุ่งยากมากนัก ทำได้โดยการตัดแปลงค่าพิกเซลของสัญญาณภาพหรือค่าบิตที่มีความสำคัญน้อยที่สุด (LSB) แต่สัญญาณลายน้ำไม่ทนทานต่อการโจมตี

2) การฝังลายน้ำในโดเมนการแปลง เป็นวิธีการฝังลายน้ำที่จะต้องอาศัยการแปลงสัญญาณภาพแบบต่าง ๆ ให้อยู่ในโดเมนความถี่ หลังจากนั้นจึงทำการตัดแปลงค่าสัมประสิทธิ์การแปลงของสัญญาณภาพ ซึ่งสัญญาณลายน้ำที่ได้จากการคัดแยกหลังการถูกโจมตีจะมีความทนทานดีกว่าในโดเมนเวลา แต่มีความซับซ้อนมากขึ้นด้วยเช่นกัน

2.3 การฝังลายน้ำดิจิทัลในโดเมนการแปลง

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าโดเมนการฝังลายน้ำที่ใช้กันอย่างมากมายคือ โดเมนการแปลง เนื่องจากสัญญาณลายน้ำมีความทนทานต่อการโจมตีและยังทำให้คุณภาพของภาพหลังการฝังลายน้ำลดลงไม่มากนัก ซึ่งวิธีการแปลงสัญญาณภาพที่นิยมใช้กันมีดังนี้

2.3.1 การฝังลายน้ำดิจิทัลในโดเมนการแปลงโคไซน์

วิธีการแปลงสัญญาณภาพแบบ DCT สัญญาณลายน้ำจะมีความทนทานต่อการโจมตีจากการกรอแบบต่ำผ่าน การปรับค่าความคมชัดและค่าความสว่าง แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้มีความยากในการดำเนินการและใช้เวลาในการคำนวณมาก นอกจากนี้สัญญาณยังอ่อนแอต่อการถูกโจมตีด้วยการหมุน การสเกล และการตัดภาพ

การฝังลายน้ำดิจิทัลในโดเมน DCT สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภท คือ การใช้แปลง DCT ทั้งภาพพร้อมกันและใช้การแบ่งภาพออกเป็นบล็อกย่อย ซึ่งอัลกอริทึมแรกที่เป็นที่รู้จักกันดีถูกเสนอโดย Cox et al. (1997) สัญญาณลายน้ำสุ่มแบบเกาส์เซียนถูกฝังเข้าไปในสัมประสิทธิ์ส่วนที่มีความสำคัญโดยใช้การกระจายแถบความถี่และหลักการด้าน Human Visual System (HVS) ทำให้สัญญาณลายน้ำมีความทนทานต่อการบีบอัดสัญญาณภาพ

2.3.2 การฝังลายน้ำในโดเมนการแปลงเวฟเลต

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาการแปลงเวฟเลตได้ถูกนำมาใช้ด้านการประมวลผลสัญญาณและการบีบอัดสัญญาณภาพกันอย่างกว้างขวาง ซึ่งในการประยุกต์ใช้บางทางการแปลง DWT ให้ผลที่ดีกว่าการแปลง DCT เช่น งานวิจัยของ Kundur and Hatzinakos (1998) ที่ได้นำการแปลง DWT มาใช้ในการฝังลายน้ำดิจิทัล สำหรับขั้นตอนจะมีความคล้ายกันกับการฝังลายน้ำในโดเมน DCT แต่จะแตกต่างกันที่วิธีการแปลงและค่าสัมประสิทธิ์ โดยมีผู้เสนอวิธีการต่าง ๆ ดังนี้

Zhu et al. (1999) นำเสนอเทคนิคการฝังลายน้ำแบบหลายระดับความละเอียด โดยลายน้ำจะถูกฝังในแบนด์ย่อยความถี่สูงทุกแบนด์ แต่ไม่ได้พิจารณาถึง HVS อย่างไรก็ตาม Kaewkamnart and Rao (2000) ได้ปรับปรุงวิธีการนี้โดยการเพิ่มส่วนของ HVS เข้าไปด้วย

Tao and Eskicioglu (2004) เสนอการฝังลายน้ำโดยใช้การแปลง DWT สัญญาณลายน้ำที่ใช้เป็นแบบสัญญาณสุ่มและถูกฝังเข้าไปทั้ง 4 แบนด์ย่อย แต่ใช้ค่าตัวประกอบการสเกลที่แตกต่างกัน โดยในแบนด์ย่อยความถี่สูงจะมีค่าต่ำและต้องใช้ภาพต้นแบบในการตรวจจับลายน้ำ

Huo and Gao (2006) นำเสนอการฝังลายน้ำลงในสัมประสิทธิ์ของแบนด์ย่อยความถี่สูงของระดับการแปลงสูงสุด โดยพิจารณาจากสัมประสิทธิ์ในตำแหน่งเดียวกันในแต่ละแบนด์ย่อย และเลือกสัมประสิทธิ์ที่มีขนาดเล็กเพื่อไม่ให้คุณภาพของภาพหลังการฝังลายน้ำลดลงมากนัก สัญญาณลายน้ำมีความทนทานต่อการถูกโจมตีด้วยการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG การเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน และการกรองแบบค่ามัธยฐาน และไม่ต้องการภาพต้นแบบในการตรวจจับลายน้ำ แต่ต้องทราบตำแหน่งของสัมประสิทธิ์ที่ถูกเลือก

Jafri and Baqai (2007) เสนอวิธีการฝังลายน้ำที่ทนทานต่อการบีบอัดสัญญาณภาพที่ใช้การแปลง DWT เทคนิคนี้จะกระจายสัญญาณลายน้ำไปสู่ส่วนของมุมเฟสของสัมประสิทธิ์การแปลงโดยใช้ DFT และการตรวจจับลายน้ำไม่ต้องใช้ภาพต้นแบบ

2.3.3 การฝังลายน้ำในโดเมนการแปลงมัลติเวฟเลต

การแปลงสัญญาณภาพอีกอย่างหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจในด้านการบีบอัดสัญญาณภาพและเริ่มมีการนำมาประยุกต์ใช้กับการฝังลายน้ำดิจิทัล นั่นคือการแปลงมัลติเวฟเลต (DMT) แต่ยังไม่เป็นที่แพร่หลายมากนัก

Zhang et al. (2002) นำเสนอการฝังสัญญาณลายน้ำแบบสัญลักษณ์ (logo) ในโดเมนการแปลงมัลติเวฟเล็ด สัญญาณลายน้ำถูกฝังโดยการปรับขั้วระหว่างสัมประสิทธิ์กับสัมประสิทธิ์ค่าเฉลี่ย นอกจากนี้ยังใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กลับ (Back-propagation neural network) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกู้คืนสัญญาณลายน้ำ

Kurugollu et al. (2003) ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการแปลงเวฟเล็ด การแปลงมัลติเวฟเล็ด การแปลงเวฟเล็ดคอมเพล็กซ์และการแปลงเวฟเล็ดแพ็คเกจ พบว่าสัญญาณลายน้ำที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ดคอมเพล็กซ์ มีความทนทานใกล้เคียงกับการใช้การแปลงมัลติเวฟเล็ด

Kumsawat P. et al. (2004) นำเสนอการฝังลายน้ำโดยใช้การแปลงมัลติเวฟเล็ด สัญญาณลายน้ำจะถูกฝังในสัมประสิทธิ์ที่มีค่ามากกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยนและมีการนำเอาจินเนติกอัลกอริทึม (genetic algorithm) มาใช้ในการค้นหาค่าขีดเริ่มเปลี่ยนและค่าความแรงของลายน้ำที่เหมาะสม เพื่อปรับปรุงคุณภาพของภาพที่ถูกฝังลายน้ำและความทนทานของสัญญาณลายน้ำ

Zhang et al. (2006) ได้นำเสนอสมรรถนะของการฝังลายน้ำโดยใช้วิธีการแปลงที่แตกต่างกันคือ การแปลงดิสคริตโคไซน์ การแปลงเวฟเล็ด และการแปลงมัลติเวฟเล็ด พบว่าภาพที่ถูกฝังลายน้ำที่ใช้การแปลงมัลติเวฟเล็ดมีคุณภาพของภาพดีกว่าและสัญญาณลายน้ำมีความทนทานต่อการประมวลผลภาพพื้นฐานดีกว่าการแปลงอีกสองวิธี

2.4 การฝังลายน้ำในโดเมนการบีบอัด

จากหัวข้อที่ผ่านมาได้มีการแบ่งโดเมนการฝังลายน้ำออกเป็น 2 ประเภทคือ โดเมนเวลาและโดเมนความถี่ แต่จากการที่การบีบอัดสัญญาณภาพและการฝังลายน้ำมีกระบวนการบางอย่างที่เหมือนกันทำให้มีการรวมกระบวนการทั้งสองเข้าด้วยกัน ทำให้ Yang et al. (2001) ได้แบ่งโดเมนการฝังสัญญาณลายน้ำออกเป็นอีกหนึ่งโดเมนคือโดเมนการบีบอัด ซึ่งบทความที่นำเสนอการฝังสัญญาณลายน้ำในโดเมนการบีบอัดยังมีจำนวนไม่มากนัก

ปัจจุบันได้มีอัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณภาพอัดจำนวนมาก แต่ที่ใช้กันเป็นมาตรฐานคือการบีบอัดสัญญาณภาพที่ถูกนำเสนอ โดย Joint Photographic Experts Group (JPEG) ทำให้มีงานวิจัยเกี่ยวกับการฝังสัญญาณลายน้ำในโดเมนการบีบอัดแบบ JPEG ค่อนข้างมาก เช่น Li and Zhang (2003) นำเสนอวิธีการฝังสัญญาณลายน้ำพร้อมกับการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG2000 สัญญาณลายน้ำที่ใช้เป็นแบบไบนารีซึ่งจะถูกฝังเข้าไปในสัมประสิทธิ์เวฟเล็ดที่มีแบนด์ย่อยอยู่ในช่วงความละเอียดกลาง (intermediate resolution) หลังจากการทำควอนไทเซชัน และสัญญาณลายน้ำสามารถกู้คืนได้ก่อนการทำ dequantization นอกจากนี้รูปแบบในการฝังสัญญาณลายน้ำยังนำค่าอัตราการบีบอัดมาใช้เป็นพารามิเตอร์ ซึ่งจะถูกใช้ในการออกแบบให้การฝังลายน้ำเป็นแบบปรับตัว

ได้ และความแรงของสัญญาณลายน้ำยังเป็นสัดส่วนกับอัตราการบีบอัดด้วย การถอดสัญญาณลายน้ำไม่จำเป็นต้องใช้ภาพหรือสัญญาณลายน้ำต้นแบบ Grosbois and Ebrahimi (2001) นำเสนอการฝังสัญญาณลายน้ำในขั้นตอนการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEGd2000 โดยใช้การแปลงเวฟเลต และใช้รูปแบบการฝังลายน้ำแบบกระจายแถบความถี่ สัญญาณลายน้ำจะถูกฝังเข้าไปในสัมประสิทธิ์เวฟเลตที่ถูกทำควอนไทเซชันแล้ว นอกจากนี้ยังได้พิจารณาคุณสมบัติของ Human visual system (HVS) เพื่อช่วยปรับปรุงคุณภาพของภาพที่ถูกฝังลายน้ำ Ya-fei et al. (2001) ได้แนะนำการรวมอัลกอริทึมการฝังลายน้ำและการบีบอัดสัญญาณภาพเข้าด้วยกัน โดยอัลกอริทึมนี้จะทำการประมาณค่าความจุ (capacity) ต่อจากนั้นจึงฝังลายน้ำด้วยอัตราบิดภายในความจุนั้น สำหรับการบีบอัดสัญญาณภาพใช้การบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG ซึ่งใช้การแปลงโคไซน์ (Discrete cosine transform) ในการแปลงสัญญาณภาพ การตรวจจับสัญญาณลายน้ำจะต้องหาตำแหน่งการฝังลายน้ำโดยใช้ข้อมูลภาพต้นแบบและอัตราการบีบอัด Li and Zhang (2003) ได้เสนอการฝังสัญญาณลายน้ำรวมกับการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG2000 ซึ่งจากวิธีการอื่นที่ทำการฝังลายน้ำในโดเมนของการแปลงเวฟเลต แต่วิธีการนี้จะฝังลายน้ำเข้าไปในสายรหัส (code stream) และเพื่อลดความผิดเพี้ยนของภาพที่เกิดจากสัญญาณลายน้ำที่ถูกฝังเข้าไปนั้น จึงมีการปรับปรุงคุณภาพด้วยตัวชดเชยส่วนความทนทานของสัญญาณลายน้ำมีการตั้งค่าบริเวณการป้องกัน (Protection region) เพื่อป้องกันการโจมตีสัญญาณลายน้ำ แต่จะต้องเลือกค่าเหล่านั้นให้เหมาะสม นอกจากนี้ Wang and Jay Kuo (1998) ได้ออกแบบการฝังสัญญาณลายน้ำรวมกับการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ multi-threshold wavelet codec (MTWC) โดยใช้การแปลงเวฟเลต การเข้ารหัสแบบ MTWC จะต้องมีการกำหนดค่าขีดเริ่มเปลี่ยนเริ่มต้นที่แตกต่างกันในแต่ละแบนด์ย่อย สัญญาณลายน้ำที่ใช้จะเป็นสัญญาณแบบสุ่มที่มีการกระจายตัวแบบเกาส์เซียน

การบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG เป็นการบีบอัดที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง แต่ได้มีการนำเสนอการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ Embedded Zerotree Wavelet (EZW) โดย Shapiro (1993) ซึ่งเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพ Inoue et al. (1998) ได้แนะนำวิธีการฝังลายน้ำโดยใช้การแปลงเวฟเลต สัญญาณลายน้ำจะถูกฝังในสัมประสิทธิ์เวฟเลตซึ่งจำแนกออกเป็น 2 ประเภท คือ สัมประสิทธิ์ที่ไม่มีความสำคัญและสัมประสิทธิ์ที่มีความสำคัญ สำหรับตำแหน่งในการฝังลายน้ำจะใช้วิธีโรตารีที่นิยามจากอัลกอริทึม EZW ผลการทดลองพบว่า ภาพที่ถูกฝังลายน้ำมีคุณภาพดีและลายน้ำมีความคงทนต่อการบีบอัดแบบ JPEG ได้ดี Said and Pearlman (1996) ได้ทำการปรับปรุงอัลกอริทึม EZW เรียกว่า Set Partitioning in Hierarchical Trees (SPIHT) ซึ่งเป็นวิธีการที่ง่าย รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพดีกว่า Yang et al. (2001) นำเสนอการฝังลายน้ำพร้อมกับการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ SPIHT ใช้สัญญาณลายน้ำแบบไบนารีฝังในโดเมนการบีบอัด ทำให้การรวมสองกระบวนการนี้ไม่มีความซับซ้อนมาก และการถอดสัญญาณลายน้ำจะต้องใช้ตำแหน่งการฝังช่วยใน

การคัดแยก Yang and Chen (2002) ได้นำเสนอการฝังลายน้ำในระนาบบิต (bit-plane) สำหรับการเข้ารหัสแบบซีโรทรี่ สัญญาณลายน้ำแบบไบนารีจะถูกฝังโดยการแก้ไขบิตโดยตรงในโดเมนการบีบอัด ซึ่งสัมพันธ์กับการฝังลายน้ำเข้าไปในนั้นจะถูกกำหนดโดยขั้นตอนการบีบอัดและต้องมีค่ามากกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยน พบว่าสัญญาณลายน้ำมีความทนทานต่อการโจมตีดีกว่าการฝังสัญญาณลายน้ำในโดเมนการแปลง Khelifi et al. (2006) นำเสนอวิธีการฝังสัญญาณลายน้ำในโดเมนการบีบอัดแบบ SPIHT โดยสัญญาณลายน้ำจะต้องใช้รหัสแก้ไขความผิดพลาด (Error-correction coding) และ ทำ interleaving ก่อน จากนั้นจึงฝังลายน้ำเข้าไปในสัมประสิทธิ์ที่มีความสำคัญในตารางพิกเซลที่มีความสำคัญ (List of Significant Pixel) การถอดสัญญาณลายน้ำสามารถทำได้โดยตรงจากไฟล์ที่ถูกบีบอัด

2.5 วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์กับการฝังลายน้ำดิจิทัล

การฝังลายน้ำดิจิทัลมีความต้องการในด้านของความทนทานของสัญญาณลายน้ำและคุณภาพของภาพหลังการฝังลายน้ำ ซึ่งเป็นความต้องการที่มีความขัดแย้งกันและเป็นเรื่องยากที่จะให้ได้คุณสมบัติทั้งสองในเวลาเดียวกัน วิธีการดั้งเดิมที่ใช้ในการแก้ปัญหา คือ การเลือกค่าพารามิเตอร์จากการทดลองหรือประสบการณ์ของผู้วิจัย ซึ่งไม่มีประสิทธิภาพมากนัก ทำให้มีการนำวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์มาใช้ในการหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการฝังลายน้ำดิจิทัล

Pan et al. (2004) นำเสนอการฝังลายน้ำสำหรับป้องกันการละเมิดลิขสิทธิ์โดยใช้ลายน้ำแบบมองเห็นได้และแบบไม่สามารถมองเห็นได้ สัญญาณลายน้ำทั้งสองจะถูกฝังในโดเมนที่แตกต่างกัน คือ ในโดเมนเวลาและโดเมนการแปลงตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้ประยุกต์ใช้การค้นหาลายน้ำแบบตามู เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการฝังลายน้ำอีกด้วย โดยการปรับปรุงค่า *PSNR* ของการฝังลายน้ำแบบมองเห็นได้และเพิ่มความทนทานของสัญญาณลายน้ำแบบไม่สามารถมองเห็นได้

Artameeyanant P. (2006) นำเสนอการฝังลายน้ำที่มีความทนทานต่อการบีบอัดสัญญาณภาพและการตัดภาพ โดยใช้การค้นหาลายน้ำแบบตามูค้นหาส่วนของ Region of Interest (ROI) ของภาพเพื่อฝังลายน้ำ ซึ่งจะทำให้สัญญาณลายน้ำมีความทนทานมากขึ้น สำหรับการแปลงสัญญาณภาพใช้การแปลง DWT

Sriyingyong N. and Attakitmongkol K. (2006) นำเสนอวิธีการฝังลายน้ำในสัญญาณเสียงดิจิทัลโดยใช้การแปลง DWT สัญญาณลายน้ำถูกฝังในสัมประสิทธิ์เวฟเล็ตและเพื่อความปลอดภัยภาพลายน้ำจะถูกสลับเปลี่ยนตำแหน่งด้วยรหัสลับ นอกจากนี้ยังได้ใช้การค้นหาลายน้ำแบบตามูเชิงปรับตัวเพื่อหาค่าความถี่ของลายน้ำที่เหมาะสม

Wei, Dai, and Li (2006) นำเสนอวิธีการฝังลายน้ำดิจิทัลเพื่อเพิ่มความเร็วของจินเนติกอัลกอริทึม ความทนทานของสัญญาณลายน้ำและคุณภาพของภาพหลังการฝังลายน้ำ ซึ่งใช้การแปลงสัญญาณภาพแบบ DCT และลายน้ำถูกฝังเข้าไปในส่วนของสัมประสิทธิ์ AC ค่าฟังก์ชันค่าความเหมาะสมใช้ค่า *PSNR* และค่า Normalized Cross-Correlation เพื่อใช้วัดค่าความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซม ซึ่งแสดงถึงค่าคุณภาพของภาพและความทนทานของสัญญาณลายน้ำตามลำดับการโจมตีสัญญาณลายน้ำประกอบด้วย การกรองแบบต่ำผ่าน การกรองแบบสูงผ่านและการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG ซึ่งให้ผลการทดสอบที่ดีทั้งด้านคุณภาพและความทนทาน นอกจากนี้ยังปรับปรุงเวลาในการดำเนินการให้เร็วขึ้นด้วย

Zhong et al. (2007) นำเสนอวิธีการฝังลายน้ำโดยใช้การแปลงเวฟเล็ตร่วมกับการแปลงอาร์โนลด์ (Arnold transformation) และใช้จินเนติกอัลกอริทึมในการหาค่าพารามิเตอร์ของการฝังลายน้ำดิจิทัล โดยภาพที่ถูกฝังลายน้ำจะผ่านการโจมตีด้วยการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG2000 การเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียนและการตัดภาพ ผลการทดสอบพบว่าคุณภาพของภาพและความทนทานของสัญญาณลายน้ำถูกปรับปรุงขึ้นได้พร้อมกัน

Ketcham M. and Vongpraphip S. (2007) นำเสนอการฝังลายน้ำในสัญญาณเสียงดิจิทัลสัญญาณลายน้ำที่ใช้เป็นแบบภาพขาวดำและประยุกต์ใช้จินเนติกอัลกอริทึมเพื่อเลือกพื้นที่การฝังลายน้ำ สำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ประกอบด้วย ค่า *SNR* และค่าสหสัมพันธ์ เพื่อชี้วัดคุณภาพของสัญญาณเสียงและความทนทานของสัญญาณลายน้ำตามลำดับ การตรวจจับลายน้ำไม่ต้องใช้สัญญาณเสียงต้นแบบ

Elshafie, Kharma, and Ward (2008) ได้ปรับปรุงรูปแบบการฝังลายน้ำแบบคู่ โดยใช้สัญญาณลายน้ำเป็นสัญญาณแบบสุ่ม นอกจากนี้ได้นำจินเนติกอัลกอริทึมมาช่วยในการหาค่า α เพื่อให้ภาพหลังการฝังลายน้ำมีคุณภาพดีและทนทานต่อการโจมตี

2.6 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมที่ผ่านมาพบว่า การฝังลายน้ำสามารถแบ่งออกตามโดเมนการฝังได้ 2 ประเภท คือ โดเมนเวลาและโดเมนการแปลง ซึ่งงานวิจัยส่วนใหญ่นิยมใช้การฝังลายน้ำในโดเมนการแปลง เนื่องจากสัญญาณลายน้ำมีความทนทานกว่าโดเมนเวลา สำหรับวิธีการแปลงที่ใช้ประกอบด้วย การแปลงดิสคริตโคไซน์ การแปลงดิสคริตเวฟเล็ต การแปลงดิสคริตมัลติเวฟเล็ต การแปลงฟูริเยร์ วิธีการแปลงที่นิยมใช้คือการแปลงดิสคริตเวฟเล็ตเพราะให้คุณภาพของภาพหลังการฝังลายน้ำที่ดีและสัญญาณลายน้ำทนทานต่อการโจมตี แต่การแปลงดิสคริตมัลติเวฟเล็ตกำลังได้รับความสนใจในด้านการบีบอัดสัญญาณภาพ ทำให้มีการนำมาประยุกต์ใช้กับการฝังลายน้ำดิจิทัล นอกจากนี้ยังได้มีผู้เสนอการฝังลายน้ำในโดเมนการบีบอัด ซึ่งเป็นการรวม

กระบวนการบีบอัดสัญญาณภาพกับการฝังลายน้ำดิจิทัลเข้าด้วยกัน และจากความต้องการของการฝังลายน้ำทำให้มีการใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์มาใช้หาค่าพารามิเตอร์ ตำแหน่งหรือพื้นที่ของการฝังลายน้ำที่เหมาะสมที่สุด เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของการฝังลายน้ำดิจิทัลอีกด้วย

บทที่ 3

ทฤษฎีเบื้องต้น

3.1 กล่าวนำ

กระบวนการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำดิจิทัลอนั้นจะต้องใช้การแปลงสัญญาณภาพก่อนการเข้ารหัสเพื่อความทนทานของสัญญาณลายน้ำ ซึ่งการแปลงที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก คือ การแปลงเวฟเลตและการแปลงมัลติเวฟเลต ดังนั้น ในหัวข้อที่ 3.2 จึงได้กล่าวถึงขั้นตอนวิธีการแปลงมัลติเวฟเลต และเมื่อนำกระบวนการบีบอัดสัญญาณภาพมารวมกับการฝังลายน้ำ ในหัวข้อที่ 3.3 จึงอธิบายถึงหลักการพื้นฐานของการบีบอัดสัญญาณภาพประเภทต่าง ๆ และหัวข้อที่ 3.4 การสร้างสัญญาณลายน้ำดิจิทัลด้วย นอกจากนี้ในหัวข้อที่ 3.5 ได้อธิบายถึงรูปแบบวิธีการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ Set Partitioning in Hierarchical Tree ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ลำดับต่อมาหัวข้อที่ 3.6 เป็นวิธีการวัดประสิทธิภาพของการบีบอัดสัญญาณภาพและการฝังลายน้ำ จากนั้นหัวข้อที่ 3.7 กล่าวถึงแนวความคิดพื้นฐานของจินเนติกอัลกอริทึมและการค้นหาแบบดาบุงเชิงปรับตัว หัวข้อที่ 3.8 เป็นการสรุปเนื้อหาของบท

3.2 การแปลงมัลติเวฟเลต

มัลติเวฟเลตเป็นการพัฒนาเพิ่มเติมต่อมาจากเวฟเลต โดยมูลฐานของปริภูมิ $L^2(R)$ ถูกสร้างโดยการเลื่อน (translation) และการขยาย (dilates) ของฟังก์ชันเวฟเลตตั้งแต่ 2 ฟังก์ชันขึ้นไป ซึ่งเรียกว่า มัลติเวฟเลต โดยทั่วไปเวฟเลตจะมีฟังก์ชันย่อ-ขยาย (scaling function) $\phi(t)$ และฟังก์ชันเวฟเลต (wavelet function) $\psi(t)$ เพียงฟังก์ชันเดียว แต่มัลติเวฟเลตมีฟังก์ชันย่อ-ขยายและฟังก์ชันเวฟเลตตั้งแต่สองฟังก์ชันขึ้นไป หรือสามารถแสดงได้ในรูปแบบของเวกเตอร์ คือ $\Phi(t) = (\phi_1(t) \ \phi_2(t) \ \dots \ \phi_r(t))^T$ เมื่อ r คือ จำนวนของฟังก์ชันย่อ-ขยาย ซึ่งมีค่าเป็นจำนวนเต็มทีมากกว่า 1 และ $\Phi(t)$ ถูกเรียกว่า มัลติสเกลลิงฟังก์ชัน (multiscaling function)

นอกจากนี้ฟังก์ชันมัลติเวฟเลต (multiwavelet function) ถูกนิยามจากเซตของฟังก์ชันเวฟเลต คือ $\Psi(t) = (\psi_1(t) \ \psi_2(t) \ \dots \ \psi_r(t))^T$ แต่เมื่อ $r=1$ จะเรียกว่า สเกลาร์เวฟเลตหรือเรียกสั้น ๆ ว่าเวฟเลต (wavelet) นั่นเอง

สำหรับมัลติเวฟเลตจะมีความคล้ายคลึงกันกับสเกลาร์เวฟเลต โดยสมการ refinement คือ

$$\Phi(t) = \sqrt{m} \sum_{k=k_0}^{k_1} h(k) \Phi(mt - k), k \in \mathbb{Z} \quad (3.1)$$

จำนวนเต็ม m คือ ตัวประกอบการขยาย (dilation factor) มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 2 ซึ่ง $h(k)$ เรียกว่า สัมประสิทธิ์รีเคอร์ชัน (recursion coefficient) เป็นเมตริกซ์ขนาดเท่ากับ $r \times r$ (Keinert, 2004) และจะตั้งฉากกันก็ต่อเมื่อ

$$\langle \phi(t), \phi(t-k) \rangle = \int \phi(t) \phi(t-k)^* dt = \delta_{0k} I \quad (3.2)$$

กำหนดให้ $m = 2$ จะได้สมการการขยายและสมการการเลื่อน คือ

$$\Phi(t) = \sqrt{2} \sum_k h(k) \Phi(2t - k) \quad (3.3)$$

$$\Psi(t) = \sqrt{2} \sum_k g(k) \Phi(2t - k) \quad (3.4)$$

มัลติเวฟเลตที่ใช้อย่างแพร่หลายชนิดหนึ่ง ถูกสร้างขึ้นโดย Donovan, Geromino, Hardin และ Massopust หรือที่เรียกว่า DGHM ซึ่งประกอบด้วยฟังก์ชันย่อ-ขยายและฟังก์ชันเวฟเลตเท่ากับสอง ($r = 2$) ซึ่งเป็นมัลติเวฟเลตที่มีคุณสมบัติตั้งฉาก คุณสมบัติสมมาตร คุณสมบัติการประมาณอันดับสองและคุณสมบัติ compact support ซึ่งไม่สามารถเกิดขึ้นได้พร้อมกันในการแปลงเวฟเลต

สมการการขยายและสมการการเลื่อนของระบบ DGHM มัลติเวฟเลต จะมีสัมประสิทธิ์ 4 ค่า คือ

$$\Phi(t) = \begin{pmatrix} \phi_1(t) \\ \phi_2(t) \end{pmatrix} = \sum_{k=-2}^1 h(k) \begin{pmatrix} \phi_1(2t-k) \\ \phi_2(2t-k) \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

เมื่อ

$$h(-2) = \frac{1}{20} \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \quad h(-1) = \frac{1}{20} \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 9 & -3\sqrt{2} \end{pmatrix}$$

$$h(0) = \frac{1}{20} \begin{pmatrix} 6\sqrt{2} & 0 \\ 9 & 10\sqrt{2} \end{pmatrix} \quad h(1) = \frac{1}{20} \begin{pmatrix} 6\sqrt{2} & 16 \\ -1 & -3\sqrt{2} \end{pmatrix}$$

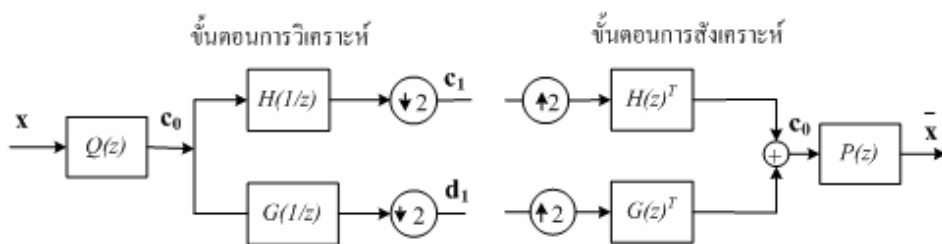
$$\Psi(t) = \begin{pmatrix} \psi_1(t) \\ \psi_2(t) \end{pmatrix} = \sum_{k=-2}^1 g(k) \begin{pmatrix} \phi_1(2t-k) \\ \phi_2(2t-k) \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

เมื่อ

$$g(-2) = \frac{1}{20} \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ -\sqrt{2} & 0 \end{pmatrix} \quad g(-1) = \frac{1}{20} \begin{pmatrix} 9 & -3\sqrt{2} \\ 9\sqrt{2} & -6 \end{pmatrix}$$

$$g(0) = \frac{1}{20} \begin{pmatrix} 9 & -10\sqrt{2} \\ -9\sqrt{2} & 0 \end{pmatrix} \quad g(1) = \frac{1}{20} \begin{pmatrix} -1 & -3\sqrt{2} \\ \sqrt{2} & 6 \end{pmatrix}$$

ทฤษฎีของการแปลงมัลติเวฟเล็ดมีแนวความคิดมาจากการวิเคราะห์หลายระดับความละเอียด (Multiresolution analysis : MRA) เหมือนกับการแปลงเวฟเล็ด แต่จะแตกต่างกันที่การแปลงมัลติเวฟเล็ดจะมีฟังก์ชันย่อ-ขยายและฟังก์ชันเวฟเล็ดมากกว่าหนึ่งฟังก์ชัน การแปลงมัลติเวฟเล็ดกำลังเป็นที่น่าสนใจเนื่องจากคุณสมบัติต่าง ๆ ซึ่งไม่สามารถเกิดขึ้นได้พร้อมกันในการแปลงเวฟเล็ด การแปลงมัลติเวฟเล็ดจะมีหลักการแปลงเหมือนกับการแปลงเวฟเล็ด โดยจะอาศัยหลักการของฟิลเตอร์เบงค์ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งจะประกอบด้วยสองขั้นตอนคือ ขั้นตอนการวิเคราะห์และขั้นตอนการสังเคราะห์ แต่จะแตกต่างกันที่สัมประสิทธิ์ตัวกรองความถี่ต่ำและความถี่สูง สำหรับสัมประสิทธิ์ของการแปลงมัลติเวฟเล็ดนั้นจะเป็นเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ ส่วนการแปลงเวฟเล็ดนั้นจะเป็นสัมประสิทธิ์ที่เป็นสเกลาร์



รูปที่ 3.1 ฟิลเตอร์เบงค์ของมัลติเวฟเล็ดใน 1 มิติ

แผนภาพฟิลเตอร์แบงก์ดังรูปที่ 3.1 สัมประสิทธิ์ $\mathbf{c}_1$ และ $\mathbf{d}_1$ มีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ $\mathbf{c}_0$ ตามอัลกอริทึมการแยกองค์ประกอบ (decomposition) และการสร้างกลับ (reconstruction) ดังนี้

$$\mathbf{c}_1(k) = \sum_n h(n) \mathbf{c}_0(2k+n) \quad (3.7)$$

$$\mathbf{d}_1(k) = \sum_n g(n) \mathbf{c}_0(2k+n) \quad (3.8)$$

$$\mathbf{c}_0(k) = \sum_n h(k-2n)^T \mathbf{c}_1(n) + \sum_n g(k-2n)^T \mathbf{d}_1(n) \quad (3.9)$$

พิจารณาฟิลเตอร์แบงก์มัลติเวฟเล็สดังรูปที่ 3.1 เมื่อ $Q(z)$ และ $P(z)$ คือ ตัวกรองก่อน (prefilter) และตัวกรองหลัง (postfilter) ตามลำดับ เวกเตอร์ $\mathbf{x}$ สามารถหาได้จากตัวดำเนินการดังนี้

$$D_r : R^Z \rightarrow (R^r)^Z \quad (3.10)$$

ซึ่งจะจัดเรียงลำดับแบบสเกลาร์ (scalar sequence) เป็นลำดับที่ถูกจัดกลุ่ม ที่มีเวกเตอร์ความยาว r สมมติให้ลำดับแบบสเกลาร์เป็น $x(n)$ โดยที่ $n \in \mathbf{Z}$ ดังนั้น $\mathbf{x} = D_r(x)$ หาได้จาก

$$\mathbf{x} = D_r(x) = (\downarrow r) \begin{pmatrix} x(n) \\ x(n+1) \\ \vdots \\ x(n+r-1) \end{pmatrix}_{n \in \mathbf{Z}}$$

$$\mathbf{x} = D_r(x) = \begin{pmatrix} x(rn) \\ x(rn+1) \\ \vdots \\ x(rn+r-1) \end{pmatrix}_{n \in \mathbf{Z}} \quad (3.11)$$

เช่น $r = 2$ ลำดับเวกเตอร์จะได้เป็น

$$\mathbf{x}(0) = \begin{pmatrix} x(0) \\ x(2) \end{pmatrix}, \mathbf{x}(1) = \begin{pmatrix} x(1) \\ x(3) \end{pmatrix}$$

จากที่กล่าวมาเป็นการแปลงมัลติเวฟเลตในหนึ่งระดับเท่านั้น การแปลงมัลติเวฟเลตหลายระดับสามารถทำได้โดยการนำสัมประสิทธิ์การแปลงแบบด้อยความถี่ต่ำมาเป็นอินพุตของขั้นตอนการแปลงแบบเดิมตามจำนวนระดับที่ต้องการ

ในกรณีของการแปลงสัญญาณภาพซึ่งเป็นสัญญาณใน 2 มิติ สามารถทำได้เช่นเดียวกับการแปลงในหนึ่งมิติ โดยการแปลงสัญญาณใน 1 มิติของแต่ละแถวโดยถือว่าในแต่ละแถวเป็นสัญญาณใน 1 มิติ จากนั้นทำการแปลงสัญญาณของแต่ละคอลัมน์จนครบตามขนาดของภาพ อย่างไรก็ตาม การแปลงมัลติเวฟเลตจะต้องทำการกรองก่อน (prefiltering) ในแต่ละแถวและในแต่ละคอลัมน์เพื่อให้ได้กลุ่มของเวกเตอร์ $\mathbf{c}_0$

ในการแปลงสัญญาณภาพด้วยการแปลงเวฟเลตจำนวน p ระดับ จะได้แบนด์ย่อยทั้งหมดเท่ากับ $(3p+1)$ แบนด์ย่อย แต่การแปลงมัลติเวฟเลตจะได้แบนด์ย่อยเท่ากับ $r^2(3p+1)$ แบนด์ย่อยหรือได้แบนด์ย่อยเท่ากับการแปลงเวฟเลตขึ้นอยู่กับการรวมกลับสัญญาณ

การรวมกลับสัญญาณของสัมประสิทธิ์การแปลงมีด้วยกันสองวิธี ซึ่งจะทำให้ได้จำนวนแบนด์ย่อยที่แตกต่างกัน เมื่อ $\mathbf{c}_1$ คือ ลำดับเวกเตอร์เอาท์พุตที่ได้จากฟิลเตอร์เบงค์ ดังนี้

$$\mathbf{c}_1 = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{r1} & c_{r2} & \cdots & c_{rn} \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

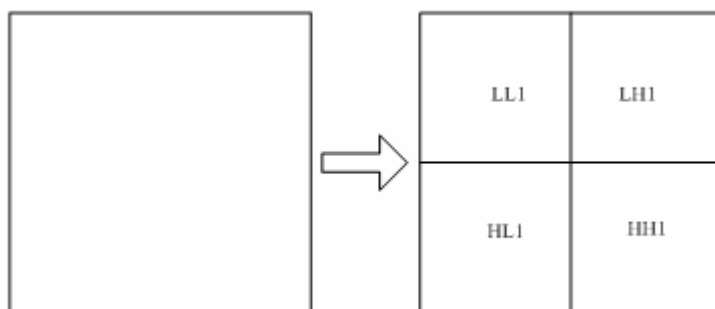
กำหนดให้ $\mathbf{c}_1$ เป็นลำดับแบบสเกลาร์ที่ได้จากการจัดเรียงของลำดับแบบเวกเตอร์ $\mathbf{c}_1$ ดังนั้น วิธีการรวมกลับแบบที่ 1 จะได้ดังสมการที่ (3.13)

$$c_1 = (c_{11}c_{21} \cdots c_{r1}c_{12}c_{22} \cdots c_{r2} \cdots c_{1n}c_{2n} \cdots c_{rn}) \quad (3.13)$$

หรือการรวมกลับแบบที่ 2 ดังสมการที่ (3.14)

$$c_1 = (c_{11}c_{12} \cdots c_{1n}c_{21}c_{22} \cdots c_{2n} \cdots c_{r1}c_{r2} \cdots c_{rn}) \quad (3.14)$$

เมื่อทำการแปลงเวฟเล็ด 1 ระดับจะได้แบนด์ย่อยทั้งหมด 4 แบนด์ย่อยดังรูปที่ 3.2 ซึ่งแต่ละแบนด์ย่อยแสดงถึงสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการผ่านตัวกรองต่าง ๆ เช่น แบนด์ย่อย LH1 แทนสัมประสิทธิ์ที่แถวของสัญญาณภาพผ่านตัวกรองความถี่สูง และคอลัมน์ของสัญญาณภาพผ่านตัวกรองความถี่ต่ำ เป็นต้น



(ก) ภาพต้นแบบ

(ข) ภาพจากการแปลงเวฟเล็ด

รูปที่ 3.2 การแปลงเวฟเล็ด 1 ระดับ

สำหรับการแปลงมัลติเวฟเล็ด 1 ระดับที่มีฟังก์ชันย่อย-ขยายเท่ากับ 2 ($r = 2$) โดยการจัดเรียงสัมประสิทธิ์แบบที่ 1 จะได้แบนด์ย่อยสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ เหมือนกับการแปลงเวฟเล็ดดังรูปที่ 3.3 (ก) แต่การจัดเรียงสัมประสิทธิ์แบบที่ 2 จะได้ดังรูปที่ 3.3 (ข)

LL1	LH1
HL1	HH1

L0L0	L1L0	L0H0	L1H0
L0L1	L1L1	L0H1	L1H1
H0L0	H1L0	H0H0	H1H0
H0L1	H1L1	H0H1	H1H1

(ก) แบบที่ 1

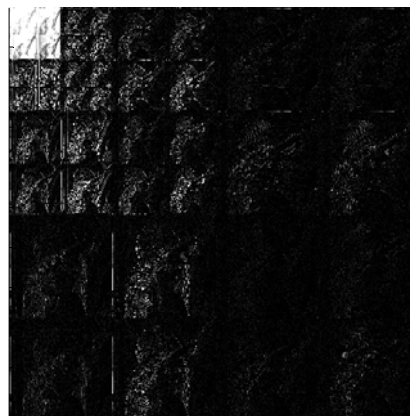
(ข) แบบที่ 2

รูปที่ 3.3 การแปลงมัลติเวฟเล็ด 1 ระดับและจัดเรียงสัมประสิทธิ์แบบต่าง ๆ

การแปลงมัลติเวฟเล็ดหลายระดับสามารถทำได้เช่นเดียวกัน โดยการนำสัมประสิทธิ์การประมาณค่าเป็นอินพุตของฟิลเตอร์เบงค์ตามจำนวนระดับที่ต้องการ ตัวอย่างภาพ Lena ที่ผ่านการแปลงมัลติเวฟเล็ดทั้งหมด 3 ระดับ จัดเรียงสัมประสิทธิ์แบบที่ 1 และแบบที่ 2 แสดงได้ดังรูปที่ 3.4 (ก) และรูปที่ 3.4 (ข) ตามลำดับ สำหรับในงานวิจัยนี้จะใช้การจัดเรียงสัมประสิทธิ์แบบที่ 1



(ก) จัดเรียงสัมประสิทธิ์แบบที่ 1



(ข) จัดเรียงสัมประสิทธิ์แบบที่ 2

รูปที่ 3.4 ภาพ Lena หลังการแปลงมัลติเวฟเล็ด 3 ระดับและจัดเรียงสัมประสิทธิ์ทั้งสองแบบ

3.3 หลักการบีบอัดสัญญาณภาพเบื้องต้น

ปัจจุบันปริมาณการใช้สัญญาณภาพดิจิทัลในด้านต่าง ๆ ได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเป็นผลมาจากเทคโนโลยีด้านการประมวลผลสัญญาณภาพได้มีการพัฒนาขึ้นหลายด้านและการพัฒนาของเครือข่ายอินเทอร์เน็ตทำให้การกระจายตัวของข้อมูลภาพทำได้ง่ายและเข้าถึงผู้ใช้งานอย่างกว้างขวาง โดยทั่วไปแล้วสัญญาณภาพดิจิทัลมีความต้องการพื้นที่ในการจัดเก็บและแบนด์วิธสำหรับการส่งจำนวนมาก เช่น ภาพสีขนาด 640×480 พิกเซล จำนวน 1 ภาพ มีความละเอียด 24 บิตต่อพิกเซล จะต้องใช้พื้นที่ในการจัดเก็บประมาณ 1 เมกะไบต์ ทำให้สิ้นเปลืองพื้นที่และแบนด์วิธของการส่ง วิธีการบีบอัดสัญญาณภาพจึงเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการแก้ปัญหานี้ ซึ่งเป็นวิธีการลดข้อมูลที่ไม่จำเป็นในภาพ หรือกล่าวอีกอย่างว่าเป็นการเพิ่มปริมาณของพื้นที่ส่วนกลางที่ใช้จัดเก็บและเพิ่มแบนด์วิธของการสื่อสาร ทำให้ปัญหาด้านการบีบอัดสัญญาณภาพเป็นปัญหาที่มีความสำคัญในการประยุกต์ข้อมูลด้านมัลติมีเดีย

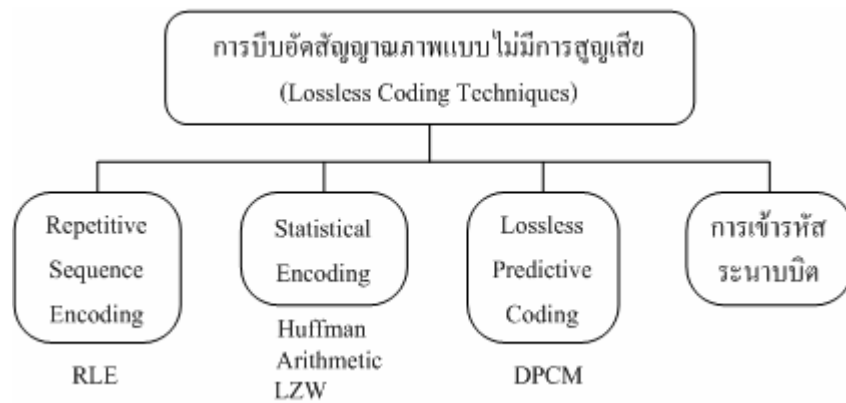
เทคนิคการบีบอัดสัญญาณภาพ (image coding) เป็นการช่วยลดความต้องการของจำนวนบิตที่ใช้ในการแทนสัญญาณภาพ ส่วนการย้อนกลับกระบวนการนี้เรียกว่า การถอดรหัส (image decoding) เพื่อสร้างกลับสัญญาณภาพจากข้อมูลที่ถูกบีบอัด ขั้นตอนการเข้ารหัสและถอดรหัสแสดงได้ดังรูปที่ 3.5 ซึ่งเรียกรวมกันว่า CODEC จุดประสงค์ของการบีบอัดสัญญาณภาพ คือ การลดจำนวนบิตให้ได้มากที่สุด แต่ยังคงรักษาความละเอียดและคุณภาพของภาพให้ใกล้เคียงกับภาพต้นแบบ



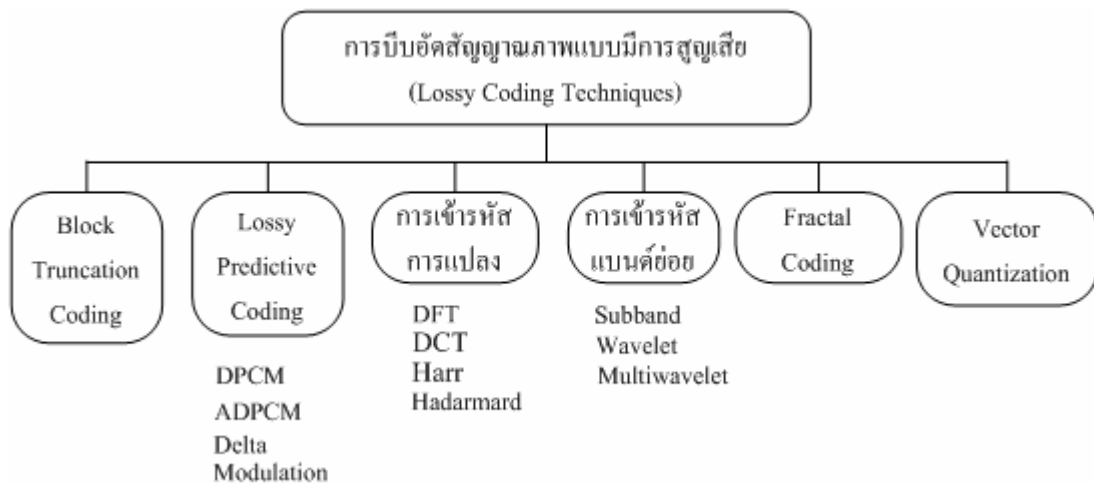
รูปที่ 3.5 รูปแบบการเข้ารหัสและถอดรหัส CODEC

การบีบอัดสัญญาณภาพสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก คือ การบีบอัดสัญญาณภาพแบบไม่มีการสูญเสีย (lossless image compression) และการบีบอัดสัญญาณภาพแบบมีการสูญเสีย (lossy image compression) โดยการพิจารณาจากความแตกต่างกันของภาพต้นแบบกับภาพจากการสร้างกลับ ถ้าไม่มีความแตกต่างกันเลยแสดงว่าเป็นการบีบอัดสัญญาณภาพแบบไม่มีการสูญเสีย ส่วนการบีบอัดสัญญาณภาพแบบสูญเสียจะอาศัยการละทิ้งข้อมูลที่ไม่มีความสำคัญไป เพื่อให้เกิดความแตกต่างกับภาพต้นแบบน้อยที่สุด

การใช้การบีบอัดสัญญาณภาพแบบไม่มีการสูญเสียไม่เป็นที่แพร่หลายนัก ส่วนมากนิยมใช้กับงานที่ต้องการความละเอียดสูง เช่น งานทางด้านการแพทย์ เป็นต้น แต่การบีบอัดสัญญาณภาพแบบมีการสูญเสียจะนิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีอัตราการบีบอัดสูงกว่าการบีบอัดสัญญาณภาพแบบไม่มีการสูญเสียและคุณภาพของภาพหลังการบีบอัดอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ กลุ่มย่อยของการบีบอัดสัญญาณภาพแต่ละประเภทสามารถจำแนกได้ดังรูปที่ 3.6



(ก) การจำแนกประเภทของการบีบอัดสัญญาณภาพแบบไม่มีการสูญเสีย



(ข) การจำแนกประเภทของการบีบอัดสัญญาณภาพแบบมีการสูญเสีย

RLE = Run Length Encoding
 LZW = Lempel-Ziv-Welch
 DPCM = Differential Pulse Code Modulation
 ADPCM = Adaptive Differential Pulse Code Modulation

รูปที่ 3.6 ประเภทของการบีบอัดสัญญาณภาพ (Subramanya, 2001)

3.3.1 การบีบอัดสัญญาณภาพแบบไม่มีการสูญเสีย

เทคนิคการบีบอัดสัญญาณภาพแบบไม่มีการสูญเสีย เป็นวิธีการที่ภาพต้นแบบสามารถที่จะสร้างกลับจากข้อมูลภาพที่ถูกเข้ารหัสได้อย่างสมบูรณ์ โดยใช้ข้อมูลทางสถิติเพื่อช่วยในการกำจัดข้อมูลที่ไม่จำเป็น เทคนิคการบีบอัดสัญญาณภาพที่เป็นที่รู้จักกันมีดังนี้ (Gonzalez and Woods, 1992; Subramanya, 2001)

1) การเข้ารหัสรันเลนจอร์ เป็นเทคนิคการแทนค่าลำดับของสัญลักษณ์หรือค่าพิกเซลของภาพด้วยลำดับที่สั้นกว่า โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของค่าพิกเซลของภาพที่อยู่ติดกันซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักและจะมีค่าซ้ำกัน ทำให้สามารถเก็บค่าพิกเซลและจำนวนที่ซ้ำกันแทนการเก็บค่าพิกเซลโดยตรง ส่วนใหญ่การเข้ารหัสแบบนี้จะใช้หลังจากกระบวนการบีบอัดสัญญาณภาพแบบสูญเสีย

ถ้าข้อมูลภาพของแต่ละพิกเซลเป็นดังนี้

00 00 11 11 11 33 33 33 55 56 56 57 57 57 57 ...

เมื่อเข้ารหัสแบบรันเลนจอร์ จะได้ดังนี้

00 02 11 03 33 03 55 01 56 02 57 04 ...

2) การเข้ารหัสฮัฟแมน เป็นการเข้ารหัสสัญลักษณ์ที่ใช้หลักการของความน่าจะเป็น โดยสัญลักษณ์ที่มีความความน่าจะเป็นมากจะถูกกำหนดให้ใช้จำนวนบิตน้อยกว่าสัญลักษณ์ที่มีความน่าจะเป็นน้อย ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการบีบอัดสัญญาณภาพแบบมาตรฐานจะใช้ขั้นตอนการบีบอัดสัญญาณภาพแบบสูญเสียก่อน จากนั้นจึงใช้การเข้ารหัสฮัฟแมนในส่วนของการขึ้นตอนสุดท้าย

3) การเข้ารหัสเลขคณิต คล้ายกับการเข้ารหัสฮัฟแมนนั่นคือจะใช้ข้อมูลทางสถิตินั่นเอง แต่จะมีอัตราการใช้บิตที่ต่ำกว่าการเข้ารหัสฮัฟแมนและจำนวนบิตจะไม่ได้แทนสัญลักษณ์แต่ละตัวจึงทำให้อัตราบิตน้อยลง นอกจากนี้ยังแยกแบบจำลองทางสถิติจากโครงสร้างของขั้นตอนการเข้ารหัสและการถอดรหัส นั่นคือข้อมูลทางสถิติของสัญลักษณ์สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยไม่ส่งผลต่อขั้นตอนการคำนวณในโมดูลการเข้ารหัสและถอดรหัส ซึ่งทำให้การเข้ารหัสเลขคณิตมีความน่าสนใจมากกว่าการเข้ารหัสฮัฟแมน

4) การเข้ารหัส Lempel-Ziv จากการเข้ารหัสฮัฟแมนและการเข้ารหัสเลขคณิตจะเห็นว่าต้องทราบถึงความน่าจะเป็นหรือข้อมูลทางสถิติของสัญลักษณ์ แต่ในบางกรณีไม่สามารถที่จะระบุได้แน่ชัดเนื่องจากมีข้อมูลหลายชนิดรวมกัน ทำให้มีการพัฒนาวิธีการเข้ารหัสแบบดิกชันนารี (dictionary-based) โดย Ziv and Lempel (1977) ซึ่งเป็นที่รู้จักกันในชื่อการเข้ารหัส Lempel-Ziv-77 (LZ77) และในอีกหนึ่งปีต่อมาได้นำเสนอวิธีการเลือกดิกชันนารีที่เรียกว่า LZ78

การเปลี่ยนแปลงของอัลกอริทึม LZ77 ทำให้มีการนำไปใช้กับงานด้านอื่น ๆ และเป็นพื้นฐานของการพัฒนาโปรแกรมการบีบอัดที่ได้รับความนิยมอย่างมาก เช่น gzip, winzip, pkzip และรูปแบบการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ Portable Network Graphics (PNG)

อัลกอริทึมที่ได้รับการพัฒนาอีกอย่างหนึ่งที่ได้รับคามนิยมคือ อัลกอริทึม Lempel-Ziv-Welch (LZW) ซึ่งพัฒนาต่อมาจาก LZ78 โดย Welch และอัลกอริทึมนี้ได้ถูกนำไปใช้สำหรับการดำเนินการบีบอัดในระบบปฏิบัติการ UNIX นอกจากนี้ขั้นตอนของ LZW ได้ถูกนำไปใช้ร่วมกับไฟล์ภาพ Graphics Interchange Format (GIF)

5) การเข้ารหัสระนาบบิต การเข้ารหัสรูปแบบนี้จะพิจารณาค่าพิกเซลของภาพด้วยค่าไบนารี โดยที่บิตในแต่ละตำแหน่งของแต่ละพิกเซลที่แสดงด้วยค่าไบนารีซึ่งจะมีขนาดเท่ากับขนาดของภาพต้นแบบจะเรียกว่าระนาบบิต แต่ละระนาบบิตสามารถที่จะนำมาใช้ในเทคนิคการเข้ารหัสแบบไม่มีการสูญเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากหลักการที่ว่าพิกเซลข้างเคียงจะมีความสัมพันธ์กัน นั่นหมายความว่าค่าของพิกเซลข้างเคียงจะแตกต่างกันน้อยมาก จึงทำให้บิตข้างเคียงในแต่ละระนาบบิตมีค่าเหมือนกัน ซึ่งจะทำให้เป็นผลดีต่อการเข้ารหัสนั่นเอง

3.3.2 การบีบอัดสัญญาณภาพแบบมีการสูญเสีย

การบีบอัดสัญญาณภาพแบบนี้เป็นวิธีการที่ยอมรับให้เกิดการสูญเสียกับสัญญาณภาพได้และเป็นที่นิยมใช้ในการบีบอัดสัญญาณภาพอย่างมาก เนื่องจากสัญญาณภาพที่ผ่านการบีบอัดจะไม่สามารถที่จะสังเกตเห็นข้อมูลในส่วนที่หายไปได้ด้วยตาเปล่า แต่ขนาดของข้อมูลจะขึ้นกับคุณภาพ นั่นคือถ้าทำการบีบอัดสัญญาณภาพให้มีขนาดเล็กคุณภาพของภาพก็จะลดลงเช่นกัน จากระบบการมองเห็นของมนุษย์จะไวต่อส่วนของความถี่ต่ำมากกว่าความถี่สูงของสัญญาณภาพ ดังนั้นต้องจัดการจำนวนบิตที่ใช้แทนความถี่เหล่านั้นให้เหมาะสม ซึ่งองค์ประกอบที่ไม่มีความสำคัญก็สามารถที่จะละทิ้งได้ ทำให้ลดขนาดของข้อมูลลงและสร้างกลับภาพได้ใกล้เคียงกับภาพต้นแบบ

1) Block truncation coding วิธีการนี้จะแบ่งภาพออกเป็นบล็อกย่อยที่ไม่ซ้อนทับกัน ซึ่งแต่ละบล็อกจะประกอบไปด้วยค่าพิกเซลของภาพและนำไปคำนวณค่าขีดเริ่มเปลี่ยน ค่าการสร้างกลับ ส่วนใหญ่แล้วค่าขีดเริ่มเปลี่ยนจะใช้ค่าเฉลี่ยของค่าพิกเซลในบล็อกนั้น ๆ ต่อจากนั้นจะได้บิตแมปของแต่ละบล็อกโดยการแทนที่ทุกพิกเซลที่มากกว่าหรือเท่ากับค่าขีดเริ่มเปลี่ยนด้วยค่า 1 และพิกเซลที่น้อยกว่าด้วยค่า 0 ดังนั้นบิตแมปของแต่ละบล็อกจะมีเฉพาะค่า 1 และ 0 เท่านั้น เพื่อใช้ในการสร้างกลับภาพในขั้นตอนการถอดรหัสต่อไป (Bovik, 2005)

2) การเข้ารหัสการแปลง เป็นการเข้ารหัสที่ต้องแปลงข้อมูลจากโดเมนเวลาให้อยู่ในรูปของโดเมนความถี่ซึ่งการแปลงสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การแปลง DFT และ DCT เป็นต้น โดยการแปลงเหล่านั้นจะเปลี่ยนค่าพิกเซลของภาพให้อยู่ในรูปแบบที่เรียกว่า สัมประสิทธิ์การแปลง ซึ่งจะมีคุณสมบัติที่ต้องการบางอย่างคือพลังงานส่วนใหญ่ของข้อมูลต้นแบบจะถูกรวมไว้ใน

บางส่วนของสัมประสิทธิ์การแปลงเท่านั้น ทำให้เป็นผลดีต่อการบีบอัดสัญญาณภาพ เนื่องจากการเข้ารหัสจะเลือกเฉพาะสัมประสิทธิ์ที่มีความสำคัญเท่านั้น จากนั้นจะนำไปทำการควอนไทเซชันและเข้ารหัสเอนโทรปี

การแปลงสัญญาณภาพที่นิยมใช้ในการเข้ารหัสแบบนี้คือ การแปลง DCT และได้นำไปใช้ในมาตรฐานการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทำการแบ่งข้อมูลออกเป็นบล็อกย่อย ๆ และทำการแปลงข้อมูลแต่บล็อกให้อยู่ในโดเมนความถี่ด้วยการแปลง DCT ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการแปลงเรียกว่า สัมประสิทธิ์ DCT ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 2 ส่วนคือ ค่าสัมประสิทธิ์ DC และค่าสัมประสิทธิ์ AC และมีสมการการแปลงดังสมการที่ 3.15 และมีสมการการแปลงกลับ DCT ดังสมการที่ 3.16 จากสมการที่ 3.15 ค่า DC คือข้อมูลตัวแรกที่ได้จากการแปลง DCT และข้อมูลที่เหลือจะเป็นค่า AC

$$C(u,v) = \frac{1}{\sqrt{2N}} a(u)a(v) \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} f(x,y) \cos\left[\frac{(2x+1)v\pi}{2N}\right] \cos\left[\frac{(2y+1)v\pi}{2M}\right] \quad (3.15)$$

$$f(x,y) = \frac{1}{\sqrt{2N}} \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{M-1} a(u)a(v)C(u,v) \cos\left[\frac{(2x+1)v\pi}{2N}\right] \cos\left[\frac{(2y+1)v\pi}{2M}\right] \quad (3.16)$$

โดยที่ $C(u,v)$ คือ สัมประสิทธิ์การแปลง DCT

$f(x,y)$ คือ ภาพต้นแบบที่มีขนาดภาพเท่ากับ $M \times N$ พิกเซล

$$a(i) = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad i = 0$$

$$a(i) = 1, \quad i > 0$$

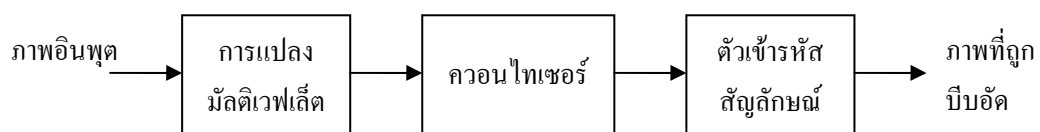
ขั้นตอนที่ 2 ทำการควอนไทเซชันค่าสัมประสิทธิ์การแปลง DCT โดยทำการควอนไทเซชันด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของการควอนไทซ์ และทำการปิดเศษขึ้นให้เป็นค่าจำนวนเต็ม ทำให้ข้อมูลมีค่าเป็นศูนย์มากขึ้น เพื่อให้การเข้ารหัสมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ขั้นตอนที่ 3 การเข้ารหัสฮัฟแมน โดยค่าสัมประสิทธิ์ DC ใช้การเข้ารหัสของผลต่างระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ DC เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ DC แต่ละบล็อกจะมีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับค่า AC จะเรียงลำดับแบบซิกแซก เพื่อให้ค่าสัมประสิทธิ์ที่มีความถี่ต่ำที่มีค่าส่วนใหญ่ไม่เป็นศูนย์อยู่ติดกัน และค่าสัมประสิทธิ์ความถี่สูงที่มีค่าส่วนใหญ่เป็นศูนย์อยู่ติดกัน เพื่อสะดวกในการเข้ารหัสแบบรันเลนจ์

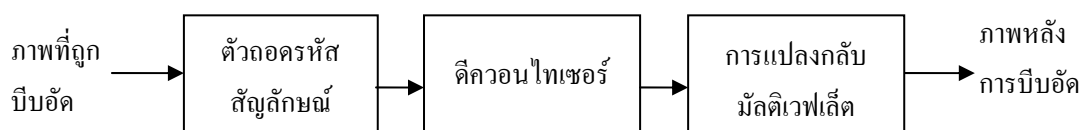
3) Vector quantization แนวความคิดพื้นฐานของวิธีนี้คือการพัฒนาพิกเซลของเวกเตอร์ที่มีขนาดคงที่เรียกว่า เวกเตอร์รหัส (code vector) โดยทั่วไปเวกเตอร์จะเป็นบล็อกของค่าพิกเซล ดังนั้นภาพจะถูกแบ่งออกเป็นบล็อกที่ไม่ซ้อนทับกัน ต่อจากนั้นนำไปหาเวกเตอร์ที่ตรงกันมากที่สุดในพิกเซลและเก็บตำแหน่งนั้นไว้เพื่อเข้ารหัสเอนโทรปี

4) Fractal coding แนวความคิดสำคัญคือการแยกภาพออกเป็นส่วนย่อยโดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพมาตรฐาน เช่น การแยกสี การตรวจจับขอบ เป็นต้น แต่ยังมีวิธีการอื่นที่สามารถแบ่งภาพออกเป็นส่วนย่อยและให้ผลการบีบอัดที่ดี เรียกว่า การแบ่งแบบ Quadtree และการแบ่งแบบ HV (Fisher, 1995) จากนั้นแต่ละส่วนย่อยจะถูกเปิดดูในไลบรารีที่เรียกว่า iterated function system (IFS) เพื่อให้ได้รหัสที่ใกล้เคียงกับภาพต้นแบบมากที่สุด

5) การเข้ารหัสแบบคีย์ย่อย เป็นวิธีการที่ต้องนำสัญญาณภาพไปผ่านแยกองค์ประกอบโดยการแปลง เช่น การแปลง DWT หรือ DMT ให้เป็นแบบคีย์ย่อยต่าง ๆ หลังจากนั้นทำการควอนไทเซชันและเข้ารหัสในแต่ละแบบคีย์ย่อยด้วยอัลกอริทึมการเข้ารหัส ซึ่งขั้นตอนโดยทั่วไปแสดงได้ดังรูปที่ 3.7



(ก) ขั้นตอนการเข้ารหัส



(ข) ขั้นตอนการถอดรหัส

รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการบีบอัดสัญญาณภาพโดยใช้การแปลงมัลติเวฟเลต

จากรูปที่ 3.7(ก) เป็นขั้นตอนการบีบอัดสัญญาณภาพโดยการนำภาพอินพุตเข้ามาทำการแปลงโดยใช้การแปลงมัลติเวฟเลต เพื่อให้ข้อมูลภาพที่จะใช้ในการบีบอัดอยู่ในโดเมนความถี่ ซึ่งจะทำให้การเข้ารหัสมีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้ข้อมูลภาพในโดเมนเวลา จากนั้นจะผ่าน

ตัวควอนไทซ์ และเข้ารหัสด้วยอัลกอริทึมต่าง ๆ จากรูปที่ 3.7(ข) แสดงขั้นตอนการถอดรหัส โดยจะนำข้อมูลที่ได้จากการเข้ารหัสผ่านอัลกอริทึมการถอดรหัส ก็จะได้สัมประสิทธิ์การแปลงมัลติเวฟเล็ดกลับมา จากนั้นจึงทำการแปลงกลับมัลติเวฟเล็ดก็จะได้ภาพต้นแบบที่ได้จากการสร้างกลับ

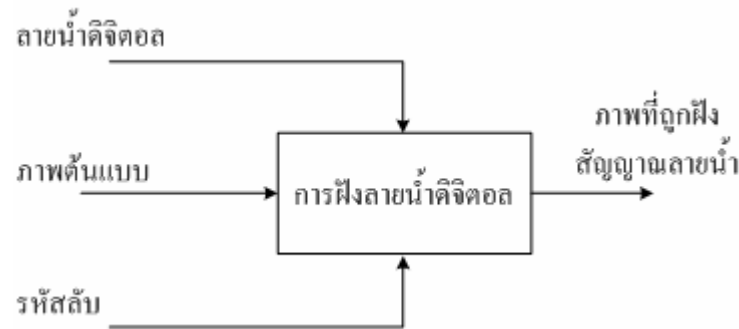
3.4 การสร้างสัญญาณลายน้ำดิจิทัล

การสร้างสัญญาณลายน้ำ คือ กระบวนการของการฝังลายน้ำลงในข้อมูลดิจิทัลเพื่อใช้ในการระบุความเป็นเจ้าของ ส่วนลายน้ำดิจิทัล คือ สัญญาณที่ถูกฝังเข้าไปในข้อมูลดิจิทัล เช่น เสียง ภาพ วิดีโอและข้อความ อย่างถาวรและสามารถตรวจจับหรือคัดแยกออกมาได้ในภายหลัง ลายน้ำดิจิทัลที่ถูกฝังเข้าไปนั้นจะต้องไม่สามารถแยกออกจากข้อมูลดิจิทัลได้ นั่นคือจะต้องมีความคงทนต่อการโจมตี (attack) แบบต่าง ๆ เช่น การกรองแบบต่ำผ่าน การกรองแบบค่านัยฐาน การบีบอัดสัญญาณภาพ หรือการตัดภาพ เป็นต้น และต้องไม่ทำให้คุณภาพของข้อมูลดิจิทัลลดลงมากนัก

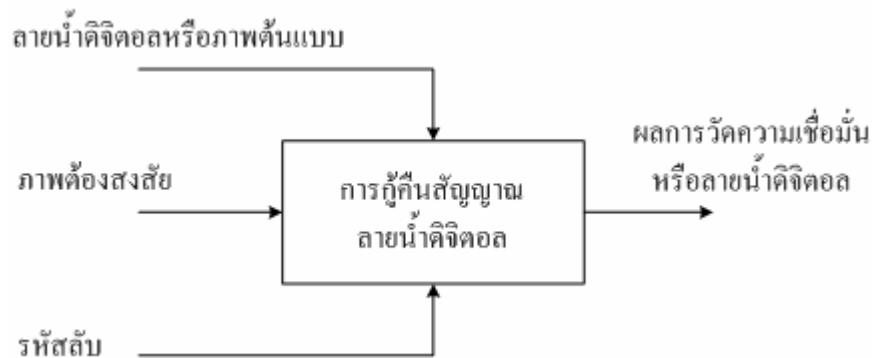
เทคนิคการฝังลายน้ำดิจิทัล กำเนิดมาจากวิธีการ steganography ซึ่งหมายถึง การเขียนที่ถูกปกปิด (covered writing) มาจากภาษากรีกคำว่า stegano หรือ “covered” และ graphos หรือ “to write” ลายน้ำสามารถแบ่งตามการมองเห็น ออกเป็น 2 ประเภท คือ แบบสามารถมองเห็นได้ (visible) และแบบไม่สามารถมองเห็นได้ (invisible) เช่น สัญญาณของช่องโทรทัศน์ที่อยู่มุมของจอภาพจะเป็นแบบมองเห็นได้ ซึ่งสามารถทำได้ง่าย แต่จะทำให้คุณภาพของข้อมูลดิจิทัลลดลง สำหรับการฝังลายน้ำแบบไม่สามารถมองเห็นได้นั้น ในงานวิจัยส่วนใหญ่นิยมฝังลายน้ำในโดเมนการแปลง (Transform domain) ซึ่งการแปลงที่ใช้มีด้วยกันหลายประเภท เช่น การแปลงดีสคริตโคไซน์ (DCT) การแปลงเวฟเล็ด (DWT) เป็นต้น และเมื่อเจ้าของข้อมูลนั้นต้องการตรวจสอบก็จะต้องใช้กุญแจลับในการคัดแยกลายน้ำ ซึ่งในการตรวจสอบความถูกต้องของลายน้ำ ถ้าต้องใช้ข้อมูลต้นแบบในการเปรียบเทียบ จะเป็นรูปแบบการฝังลายน้ำที่เรียกว่า non-blind watermarking และถ้าไม่ใช้ข้อมูลต้นแบบในการตรวจจับลายน้ำ เรียกว่า blind watermarking

3.4.1 โครงสร้างของการฝังและการถอดสัญญาณลายน้ำ

โดยทั่วไปกระบวนการในการสร้างสัญญาณลายน้ำดิจิทัลจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของการฝังลายน้ำดิจิทัลและส่วนของการกู้คืนสัญญาณลายน้ำดิจิทัล แสดงได้ดังรูปที่ 3.8 (Seitz, 2005) ซึ่งจะเห็นว่าในขั้นตอนของการฝังสัญญาณลายน้ำประกอบไปด้วยภาพต้นแบบสัญญาณลายน้ำและจะต้องมีการใส่รหัสลับหรือกุญแจสาธารณะจากผู้เป็นเจ้าของภาพเข้าไปเพื่อเป็นการเพิ่มความปลอดภัยให้กับภาพ เมื่อผ่านขั้นตอนการฝังลายน้ำแล้วก็จะได้ภาพที่ถูกฝังลายน้ำ และสำหรับการกู้คืนลายน้ำจะต้องใช้ลายน้ำดิจิทัลต้นแบบหรือภาพต้นแบบและรหัสลับขึ้นอยู่กับการฝังลายน้ำ เพื่อระบุว่าสัญญาณลายน้ำหรือไม่



(ก) ขั้นตอนการฝังลายน้ำ



(ข) ขั้นตอนการถอดลายน้ำ

รูปที่ 3.8 การสร้างสัญญาณลายน้ำและการถอดสัญญาณลายน้ำ

3.4.2 ชนิดของสัญญาณลายน้ำดิจิทัล

สัญญาณลายน้ำดิจิทัลโดยทั่วไปจะมีด้วยกัน 2 ชนิดหลักที่สามารถฝังลงไปในสัญญาณภาพได้ คือ

1) สัญญาณลายน้ำแบบลำดับสุ่มเกาส์เซียน สัญญาณลายน้ำแบบนี้จะเป็นลำดับตัวเลขที่อยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 ซึ่งอาจจะปรับให้มีค่าเป็นไบโพลาร์ คือ -1 กับ 1 เท่านั้นก็ได้ โดยจะมีการกระจายตัวแบบเกาส์เซียนด้วยค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และค่าความแปรปรวนเท่ากับ 1 และส่วนใหญ่สัญญาณลายน้ำนี้จะถูกใช้สำหรับการตรวจจับที่ใช้การวัดค่าสหสัมพันธ์

2) สัญญาณลายน้ำแบบภาพขาวดำหรือภาพระดับเทา ในบางกรณีอัลกอริทึมจะฝังลายน้ำที่มีความหมาย นั่นคือ ภาพสัญลักษณ์แทนลำดับสุ่ม โดยภาพสัญลักษณ์นั้นจะอยู่ในรูปของภาพขาวดำหรือภาพระดับเทา

3.4.3 ความต้องการของการฝังลายน้ำดิจิทัล

การประยุกต์ใช้การฝังลายน้ำแต่ละประเภทมีความต้องการที่แตกต่างกัน แต่ความต้องการหลัก คือ

1) ความไม่สามารถมองเห็นได้ (Invisibility) คือ สัญญาณลายน้ำที่ฝังเข้าไปจะต้องไม่ทำให้ภาพต้นแบบและภาพที่ถูกฝังลายน้ำแตกต่างกันมากนัก ซึ่งโดยทั่วไปแล้วผู้ใช้ไม่มีโอกาสที่จะเปรียบเทียบความแตกต่างกับภาพต้นแบบ ดังนั้น จึงสามารถยอมให้มีความแตกต่างกันเกิดขึ้นได้แต่อย่างไรก็ตาม ความต้องการนี้จะมีความขัดแย้งกับความทนทานของลายน้ำ ทำให้มีการนำหลักการทางด้านระบบการมองเห็นของมนุษย์มาช่วยในกระบวนการฝังลายน้ำ

2) ความทนทาน (Robustness) ความทนทานของสัญญาณลายน้ำต่อการถูกโจมตีเป็นปัญหาสำคัญของการป้องกันการละเมิดลิขสิทธิ์ ซึ่งเกิดจากผู้ใช้งานต้องการที่จะปรับปรุงคุณภาพของภาพ ต้องการบีบอัดข้อมูล แก้ไขหรืออื่น ๆ ดังนั้น สัญญาณลายน้ำจะต้องมีความทนทานต่อการประมวลผลภาพ ดังนี้

2.1) การบีบอัดสัญญาณภาพแบบมีการสูญเสีย เนื่องจากเป็นวิธีการที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในการจัดเก็บหรือส่งข้อมูลภาพ วิดีโอ และเสียง ที่รู้จักกันดี คือ อัลกอริทึมการบีบอัดแบบ JPEG ซึ่งให้อัตราการบีบอัดสูงและมีคุณภาพของภาพดี แต่อย่างไรก็ตามอัลกอริทึมการบีบอัดแบบนี้จะละทิ้งข้อมูลบางส่วน ทำให้ส่งผลกระทบต่อสัญญาณลายน้ำด้วยเช่นกัน

2.2) การกรองและการปรับปรุงคุณภาพ กระบวนการนี้ใช้ในการกรองสัญญาณรบกวนด้วยการกรองหรือปรับปรุงคุณภาพของภาพโดยใช้วิธีการมาตรฐานต่าง ๆ นอกจากนี้ยังอาจจะมีการออกแบบตัวกรองเพื่อใช้ในการทำลายสัญญาณลายน้ำโดยเฉพาะ

2.3) การตัดแปลงทางเรขาคณิต ในกรณีของสัญญาณภาพ เช่น การสเกล การหมุน การตัด การสะท้อน หรือการคัดแยกลายเส้น เป็นต้น ซึ่งยังไม่มีรูปแบบทั่วไปในการแก้ปัญหานี้

2.4) การนำเสนอภาพด้วยวิธีการอื่น โดยปกติการนำภาพไปใช้จะคัดลอกไปใช้ได้โดยตรง แต่อาจจะมีการพิมพ์ภาพที่ถูกฝังลายน้ำ จากนั้นทำการสร้างภาพขึ้นมาใหม่โดยการสแกน ถ้ากระบวนการนี้ไม่ทำให้คุณภาพของภาพลดลง ดังนั้นสัญญาณลายน้ำควรจะต้องสามารถตรวจจับลายน้ำได้

3) ความปลอดภัย (Security) คือ รูปแบบการฝังลายน้ำต้องมีความปลอดภัยเมื่ออัลกอริทึมการฝังถูกเผยแพร่ออกสู่สาธารณะ ซึ่งจะต้องมีรหัสลับในการป้องกัน ในบางอัลกอริทึมจะใช้ภาพต้นแบบในกระบวนการคัดแยกลายน้ำหรืออาจจะใช้รหัสลับในการสร้างสัญญาณลายน้ำ

3.5 การบีบอัดสัญญาณภาพแบบ Set Partitioning in Hierarchical Tree

ภาพที่นำมาทำการบีบอัดจะทำการแยกองค์ประกอบแบบนัยด้วยการแปลงดีสครีตเวฟเลตหรือการแปลงดีสครีตมัลติเวฟเลต จากการแยกองค์ประกอบนี้จะได้ส่วนของความถี่สูงและความถี่ต่ำ โดยในส่วนของแบบนัยของความถี่สูงจะเป็นขอบหรือลายเส้นของวัตถุ ในขณะที่แบบนัยของความถี่ต่ำจะเป็นส่วนที่เป็นพื้นผิวของวัตถุ ดังนั้นจะต้องให้ความสำคัญกับทุกแบบนัยเพื่อให้ภาพหลังการบีบอัดเหมือนภาพต้นแบบมากที่สุด ซึ่งอัลกอริทึม Set Partitioning in Hierarchical Tree (SPIHT) จะให้ความสำคัญกับขนาดของสัมประสิทธิ์ ดังนั้น การเข้ารหัสจึงให้ความสำคัญกับทุกแบบนัย

Embedded Zerotrees Wavelet (EZW) เป็นวิธีการบีบอัดสัญญาณภาพวิธีหนึ่ง ซึ่งให้ผลการบีบอัดที่ดีกว่า JPEG และกำจัดผลของการเกิดบล็อกอาติแฟกต์ คือการเกิดบล็อกที่ขอบของวัตถุและลายเส้น เนื่องจาก EZW จะให้ความสำคัญกับขนาดของสัมประสิทธิ์ทุกแบบนัยไม่ว่าจะอยู่ในแบบนัยของความถี่ใดก็ตาม ต่อมาได้มีการพัฒนาอัลกอริทึมนี้เพื่อให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นหลายวิธีด้วยกัน งานวิจัยนี้จะใช้อัลกอริทึมการเข้ารหัสด้วยวิธี SPIHT ซึ่งพัฒนาโดย Said และ Pearlman อัลกอริทึมนี้ให้ผลการบีบอัดข้อมูลภาพได้ดีกว่า EZW นอกจากนี้ยังมีขั้นตอนการเข้ารหัสที่เร็วและเข้าใจง่าย

3.5.1 ความสัมพันธ์แบบ Spatial Orientation Trees

โดยปกติแล้วพลังงานของภาพส่วนใหญ่จะอยู่ในแบบนัยของความถี่ต่ำ ซึ่งจะมีค่าลดลงไปตามการแปลงเวฟเลตระดับสูงสุดไปหาระดับต่ำสุด อย่างไรก็ตาม แต่ละแบบนัยจะมีความสัมพันธ์กันแบบ spatial และขนาดของสัมประสิทธิ์จะถูกคาดหวังว่าจะมีลำดับเรียงตามขนาดจากมากไปน้อย ถ้ามีทิศทางตามระดับการแปลงสูงสุดลงไประดับการแปลงต่ำสุดเหมือน spatial orientation

โดยทั่วไปแล้ว spatial orientation จะนิยามความสัมพันธ์เป็นลำดับชั้นพีระมิด ดังรูปที่ 3.9 โหนดจะอยู่ในระดับสูงสุดหรือในช่วงความถี่ต่ำ ซึ่งถูกระบุด้วยตำแหน่งพิกเซล ทิศทางการสืบทอดจะอยู่ในระดับถัดไป หนึ่งพิกเซลจะมีการสืบทอดไปอีก 4 พิกเซล แต่ในระดับสูงสุดซึ่งเป็นโหนดจะถูกแบ่งเป็นกลุ่มขนาด 2×2 พิกเซลติดกัน ซึ่งจะมี 1 พิกเซลที่ไม่การสืบทอด และจะมีการกำหนดตารางของตำแหน่งเพื่อใช้กับความสัมพันธ์แบบ spatial orientation tree ดังนี้

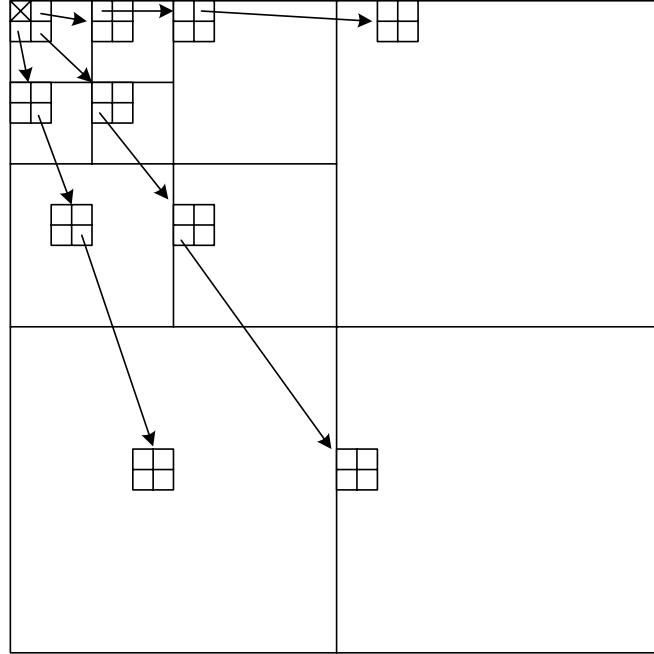
(i, j) คือ ตำแหน่งของโหนด (node)

$O(i, j)$ คือ เซตของตำแหน่งของการสืบทอด offspring ของโหนด (i, j) โดย 1 โหนดจะมีค่าของ offspring ทั้งหมด 4 ค่า

$D(i, j)$ คือ เซตของตำแหน่งของการสืบทอดทั้งหมด (descendant) ของโหนด (i, j)

H คือ เซตของตำแหน่งของโหนดในแบบนัยสูงสุด

$L(i, j) = D(i, j) - O(i, j)$ คือ เซตของตำแหน่งการสืบทอดทั้งหมด (descendant)
 ยกเว้นการสืบทอดที่เป็น offspring



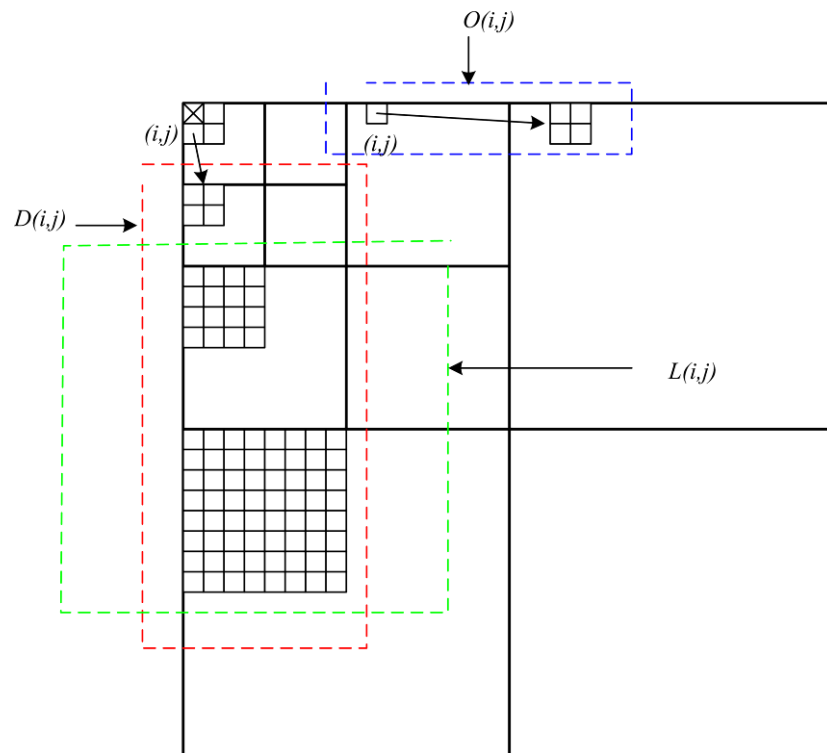
รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์แบบ spatial orientation tree

ยกตัวอย่างการหาตำแหน่งยกเว้นระดับแบนด์ย่อยสูงสุดและต่ำสุด สามารถหาตำแหน่งของ offspring ได้ดังนี้

$$O(i, j) = \{(2i, 2j), (2i, 2j+1), (2i+1, 2j), (2i+1, 2j+1)\} \quad (3.17)$$

ในวิธีการนี้จะใช้ส่วนของ spatial orientation tree แบ่งเป็นเซตย่อยในอัลกอริทึมการจัดลำดับความสำคัญของค่าสัมประสิทธิ์ (sorting) ซึ่งมีวิธีการดังนี้

- 1) กำหนดให้การแบ่งอยู่ในรูปของเซต $\{(i, j)\}$ และ $D(i, j)$ เมื่อ $(i, j) \in H$
- 2) ถ้า $D(i, j)$ มีความสำคัญ ดังนั้นจะถูกแบ่งเป็น $L(i, j)$ กับเซตของตำแหน่ง 4 ตำแหน่ง คือ (k, l) ซึ่ง $(k, l) \in O(i, j)$
- 3) ถ้า $L(i, j)$ มีความสำคัญ ดังนั้นจะถูกแบ่งเป็นเซตของ $D(k, l)$ จำนวน 4 เซต ซึ่ง $(k, l) \in O(i, j)$



รูปที่ 3.10 ตำแหน่งการสืบทอดของ spatial orientation

3.5.2 อัลกอริทึมการเข้ารหัส

ในการเข้ารหัสจะให้ความสำคัญกับขนาดของสัมประสิทธิ์เพื่อกำหนดว่ามีความสำคัญหรือไม่มีความสำคัญ ซึ่งจะมีตารางที่ใช้ในการเก็บตำแหน่งของสัมประสิทธิ์ 3 ตาราง ดังนี้ (Said and Pearlman, 1996)

- 1) List of Insignificant Sets (LIS) ใช้เก็บตำแหน่งของกลุ่มสัมประสิทธิ์เวฟเล็ตที่ไม่มีความสำคัญ สามารถแบ่งย่อยได้อีก 2 ชนิด คือชนิด A และชนิด B ซึ่งค่าที่จะเก็บในชนิด A แสดงว่าเป็น $D(i, j)$ และชนิด B แสดงว่าเป็น $L(i, j)$
- 2) List of Insignificant Pixels (LIP) ใช้เก็บตำแหน่งของสัมประสิทธิ์เวฟเล็ตที่ไม่มีความสำคัญ
- 3) List of Significant Pixels (LSP) ใช้เก็บตำแหน่งของสัมประสิทธิ์เวฟเล็ตที่มีความสำคัญ

ฟังก์ชันการเข้ารหัสระหว่างขนาดของสัมประสิทธิ์และการส่งออกค่าบิต เพื่อชี้ให้เห็นว่าเซตของตำแหน่ง Γ มีความสำคัญ สามารถทำได้ดังสมการ

$$S_n(\Gamma) = \begin{cases} 1, & \max_{(i,j) \in \Gamma} \{|c_{i,j}|\} \geq 2^n \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.18)$$

และเพื่อให้รูปแบบการแทนของพิกเซลเดี่ยวของเซตนั้น ๆ ง่ายขึ้น จะเขียนแทน $S_n(\{(i,j)\})$ ด้วย $S_n(i,j)$

การเข้ารหัสโดยใช้อัลกอริทึม SPIHT สามารถเขียนเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

1) การกำหนดค่าเริ่มต้นให้แต่ละตารางและการหาค่าขีดเริ่มเปลี่ยน

- คำนวณค่า n จากสมการ

$$n = \left\lfloor \log_2 \left(\max_{(i,j)} \{|c_{i,j}|\} \right) \right\rfloor \quad (3.19)$$

- คำนวณหาค่าขีดเริ่มเปลี่ยนจาก

$$T = 2^n \quad (3.20)$$

- กำหนดให้ LSP เป็นตารางว่าง

- กำหนดให้ LIP เก็บค่าตำแหน่งของสัมประสิทธิ์ของแบนด์ย่อยสูงสุด โดย

$$(i,j) \in H$$

- กำหนดให้ LIS เก็บค่าการสืบทอดทั้งหมดของโนดทุกโนดใน H และให้เป็นชนิด A นั่นคือ เป็น $D(i,j)$

2) ขั้นตอนการทำ Sorting Pass

กระบวนการของ LIP

2.1) สำหรับแต่ละค่าสัมประสิทธิ์ (i,j) ใน LIP

- ส่งค่า $S_n(i,j)$ ออก

- ถ้า $S_n(i, j) = 1$ ดังนั้น

- ย้ายค่าตำแหน่ง (i, j) ไปที่ตาราง LSP
- ส่งค่าบิตเครื่องหมายของค่าสัมประสิทธิ์ $c_{i,j}$ โดยที่ ถ้าเครื่องหมายเป็นลบส่งออกค่าบิต 0 และเครื่องหมายเป็นบวกส่งออกค่าบิต 1

กระบวนการของ LIS

2.2) สำหรับแต่ละเซต (i, j) ใน LIS

2.2.1) ถ้าเซตนั้นเป็นชนิด A ดังนั้น

- ส่งออกค่า $S_n(D(i, j))$
- ถ้า $S_n(D(i, j)) = 1$ ดังนั้น
 - * สำหรับแต่ละ $(k, l) \in O(i, j)$
 - ส่งออกค่า $S_n(k, l)$
 - ถ้า $S_n(k, l) = 1$
 - ดังนั้น เพิ่ม (k, l) ในตาราง LSP และส่งค่าบิตเครื่องหมายของสัมประสิทธิ์ $c_{k,l}$ โดยที่ ถ้าเครื่องหมายเป็นลบส่งออกค่าบิต 0 และเครื่องหมายเป็นบวกส่งออกค่าบิต 1
 - ถ้า $S_n(k, l) = 0$
 - ดังนั้น เพิ่มตำแหน่ง (k, l) ไปที่ท้ายตารางของ LIP
 - * ถ้า $L(i, j)$ ไม่เท่ากับเซตว่าง ดังนั้น ย้ายตำแหน่ง (i, j) ไปที่ท้ายตารางของ LIS กำหนดให้เป็นชนิด B และไปที่ขั้นตอน 2.2.2) ถ้าเป็นอย่างอื่น ให้นำค่าตำแหน่ง (i, j) ออกจากตารางของ LIS

2.2.2) ถ้าเซตที่นำเข้านั้นเป็นชนิด B ดังนั้น

- ส่งออกค่า $S_n(L(i, j))$
- ถ้า $S_n(L(i, j)) = 1$ ดังนั้น
 - * เพิ่มค่าของแต่ละตำแหน่ง $(k, l) \in O(i, j)$ ที่ท้ายตารางของ LIS และกำหนดให้เป็นชนิด A
 - * ย้าย (i, j) ออกจากตาราง LIS

3) ขั้นตอนการทำ Refinement pass

กระบวนการของ LSP

- สำหรับแต่ละค่าตำแหน่ง (i, j) ในตาราง LSP ยกเว้นค่าที่เพิ่มเข้ามาในรอบล่าสุด
 - ส่งออกค่าบิตที่มีความสำคัญตำแหน่งบิตที่ n ของ $|c_{i,j}|$

4) ขั้นตอนการปรับปรุง Quantization-Step

- ลดค่า n ลง เท่ากับ

$$n = n - 1 \quad (3.21)$$

- ทำซ้ำตามขั้นตอนที่ 2) และขั้นตอนที่ 3) และหยุดการเข้ารหัสเมื่อได้จำนวนบิตตามที่ต้องการ

การเก็บไฟล์ข้อมูลภาพที่ได้

การเก็บไฟล์ข้อมูลภาพจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนหัวและส่วนที่ได้รับจากการเข้ารหัส โดยแต่ละส่วนแยกเป็นรายละเอียดดังนี้

1) ไฟล์ส่วนหัว

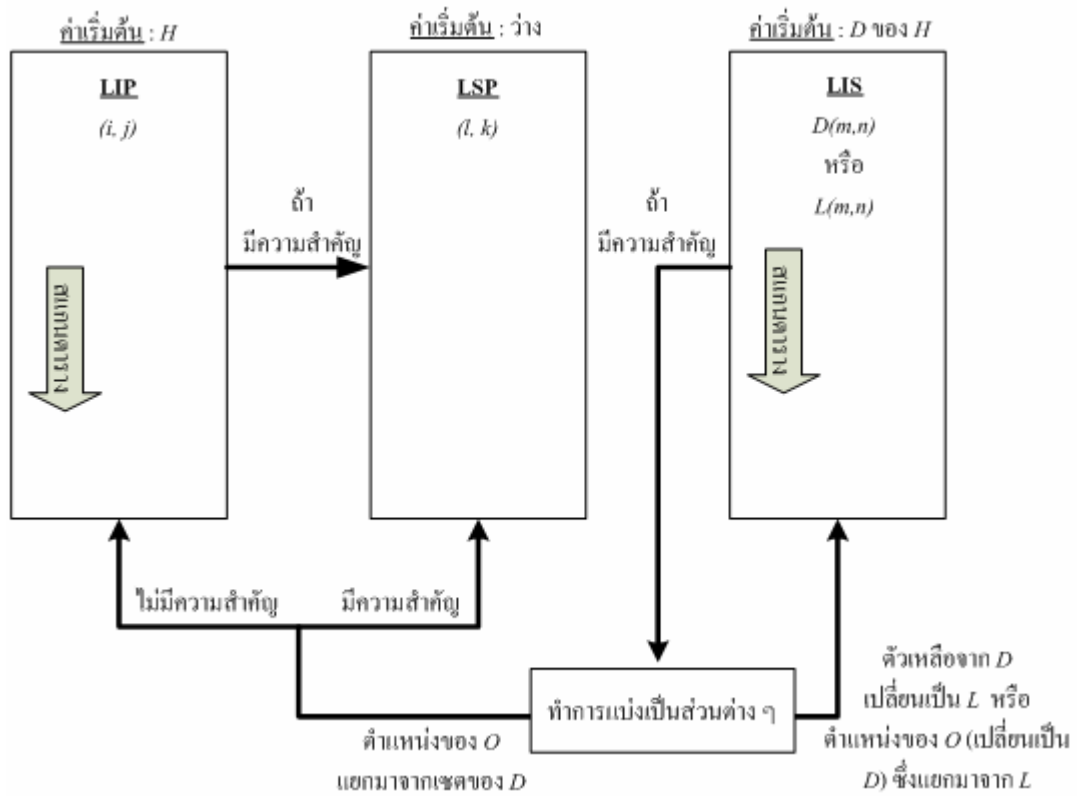
1.1) ค่า n

1.2) ระดับการแปลง

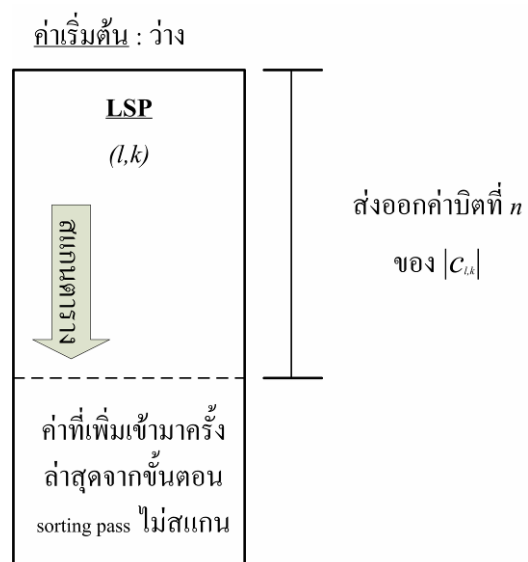
2) ไฟล์ข้อมูลที่ได้จากการเข้ารหัสด้วยวิธี SPIHT

3.5.3 อัลกอริทึมการถอดรหัส

การถอดรหัสจะใช้อัลกอริทึมเดียวกันกับการเข้ารหัส แต่เปลี่ยนจากส่งค่าออกเป็นรับค่าเข้าสำหรับแต่ละค่าของ n และจากการที่ตำแหน่งถูกย้ายเข้าสู่ตาราง LSP จะทำให้ทราบว่า $2^n \leq c_{i,j} \leq 2^{n+1}$ ดังนั้น จะใช้เงื่อนไขนี้กับบิตเครื่องหมายเพื่อสร้างกลับภาพโดย $\hat{c}_{i,j} = \pm 1.5 \times 2^n$ และในขั้นตอน refinement pass ก็จะมีการบวกหรือลบด้วย 2^{n-1} หลังจากการถอดรหัสก็จะได้สัมประสิทธิ์การแปลงค่าใหม่ เพื่อใช้ในการแปลงกลับสัญญาณภาพ



รูปที่ 3.11 ขั้นตอนของกระบวนการ Sorting Pass



รูปที่ 3.12 ขั้นตอนของกระบวนการ Refinement Pass

3.6 การวัดประสิทธิภาพของการบีบอัดสัญญาณภาพและการฝังลายน้ำดิจิทัล

การวัดประสิทธิภาพนั้นจะพิจารณาออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของคุณภาพของภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำ โดยการบีบอัดสัญญาณภาพแบบสูญเสียจะมีการละทิ้งข้อมูลบางส่วนและกระบวนการฝังลายน้ำจะทำการดัดแปลงสัมประสิทธิ์การแปลงจึงทำให้ภาพหลังการบีบอัดพร้อมกับฝังลายน้ำมีความแตกต่างกับภาพต้นแบบ ในส่วนที่สองเป็นการวัดความทนทานของสัญญาณลายน้ำของภาพหลังการถูกโจมตีหรือภาพต้องสงสัยเพื่อบ่งชี้ว่าสามารถตรวจจับสัญญาณลายน้ำได้หรือไม่

3.6.1 การวัดเชิงปริมาณ

การวัดเชิงปริมาณเป็นการอาศัยข้อมูลเชิงตัวเลขหรือทางสถิติในการชี้วัดคุณภาพของภาพ ซึ่งสามารถหาได้หลายวิธี เช่น

1) ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของภาพขนาด $M \times N$ สามารถหาได้ดังนี้

$$MSE = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (I_{org}(i, j) - I_w(i, j))^2 \quad (3.22)$$

เมื่อ $I_{org}(i, j)$ คือ ค่าพิกเซลของภาพต้นแบบตำแหน่งที่ (i, j)

$I_w(i, j)$ คือ ค่าพิกเซลของภาพที่ถูกบีบอัดและฝังลายน้ำตำแหน่งที่ (i, j)

M คือ ขนาดความกว้างของภาพ

N คือ ขนาดความยาวของภาพ

ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย ถ้ามีค่ามากแสดงว่าภาพที่ได้จากการสร้างกลับหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำมีความแตกต่างกับภาพต้นแบบมาก แต่ถ้ามีค่าน้อยแสดงว่าภาพที่ได้จากการสร้างกลับมีความแตกต่างกับภาพต้นแบบน้อย

2) อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงสุด เป็นหน่วยที่ใช้วัดคุณภาพของภาพที่นิยมใช้โดยทั่วไป ถ้าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงสุดมีค่ามาก แสดงว่าภาพที่ได้จากการสร้างกลับหลังจากการบีบอัดและฝังลายน้ำมีความแตกต่างกับภาพต้นแบบไม่มาก แต่ถ้าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงสุดมีค่าน้อยแสดงว่า ภาพที่ได้จากการสร้างกลับมีค่าแตกต่างกับภาพต้นแบบมาก ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

$$PSNR = 10 \log \left(\frac{255^2}{MSE} \right) \quad (\text{dB}) \quad (3.23)$$

3) **ดัชนีชี้วัดคุณภาพ QI** หน่วยการวัดคุณภาพของภาพที่ได้รับความนิยมมาก คือ ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยและค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงสุดซึ่งได้กล่าวมาแล้วนั้น สามารถคำนวณได้ง่ายไม่มีความซับซ้อนมากนัก อย่างไรก็ตาม ค่าเหล่านั้นไม่ได้พิจารณาถึงความสัมพันธ์กับการมองเห็นของมนุษย์เพราะว่าคำนวณจากค่าความแตกต่างกันของค่าพิกเซลต่อพิกเซลเท่านั้น ต่อมาจึงได้มีการพัฒนาโดยใช้แบบจำลองระบบการมองเห็นของมนุษย์ แต่มีการดำเนินการที่ซับซ้อนมาก Sendashonga and Labeau (2006) ได้นำเสนอการวัดคุณภาพของภาพในโดเมนความถี่ สามารถคำนวณได้ดังนี้

- ทำการแปลงสัญญาณภาพให้อยู่ในโดเมนความถี่โดยใช้การแปลงเวฟเลต
- คำนวณค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของแต่ละแบนด์ย่อยระหว่างภาพต้นแบบและภาพที่ถูกฝังลายน้ำ
- คำนวณหาค่าดัชนีชี้วัดคุณภาพโดยการถ่วงน้ำหนักค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของแต่ละแบนด์ย่อยดังสมการ

$$QI = (w_{LL}MSE_{LL} + w_{HL}MSE_{HL} + w_{LH}MSE_{LH} + w_{HH}MSE_{HH})^{1/2} \quad (3.24)$$

โดยที่ w_{ij} คือ ค่าตัวประกอบการถ่วงน้ำหนักของแต่ละแบนด์ย่อย เมื่อ $\{ij\} = \{LL, HL, LH, HH\}$

และค่าตัวประกอบการถ่วงน้ำหนัก w_{ij} สามารถคำนวณได้จาก

$$w_{ij} = [q_{ij} (q_{LL}^{-1} + q_{HL}^{-1} + q_{LH}^{-1} + q_{HH}^{-1})]^{-1} \quad (3.25)$$

และ $\sum w_{ij} = 1$

โดยที่ q_{ij} คือ ตัวประกอบควอนไทเซชันเวฟเลต (wavelet quantization factor) ของแต่ละแบนด์ย่อย เมื่อ $\{ij\} = \{LL, HL, LH, HH\}$

4) อัตราบิต เป็นค่าที่ใช้บ่งบอกถึงค่าเฉลี่ยของจำนวนบิตต่อพิกเซลของภาพที่ผ่านการบีบอัด สามารถหาได้จาก

$$\text{อัตราบิต} = \frac{\text{จำนวนบิตทั้งหมดของภาพที่ผ่านการบีบอัดข้อมูล}}{\text{จำนวนพิกเซลทั้งหมดของภาพต้นแบบ}} \quad (3.26)$$

ถ้าค่าอัตราบิตน้อยแสดงว่าขนาดของข้อมูลจะมีขนาดเล็ก แต่ถ้าอัตราบิตมากขนาดของข้อมูลจะมีขนาดใหญ่ขึ้นด้วยเช่นกัน

5) อัตราการบีบอัด (Compression Ratio, CR) เป็นค่าอัตราส่วนของจำนวนบิตของภาพต้นแบบต่อจำนวนบิตของภาพหลังการบีบอัด ซึ่งถ้าอัตราการบีบอัดสูงข้อมูลจะมีขนาดใหญ่ แต่ถ้ามีอัตราการบีบอัดต่ำข้อมูลจะมีขนาดเล็ก สามารถคำนวณได้จาก

$$CR = \frac{\text{จำนวนบิตทั้งหมดของภาพต้นแบบ}}{\text{จำนวนบิตทั้งหมดของภาพที่ผ่านการบีบอัดข้อมูล}} \quad (3.27)$$

6) ค่าอัตราส่วนความถูกต้องบิต (Bit Correct Ratio : BCR) ใช้เพื่อวัดค่าความถูกต้องของสัญญาณลายน้ำ คำนวณได้จาก

$$BCR(W, W') = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{L_w} (w_i \oplus w'_i)}{L_w} \right) \times 100 \quad (3.28)$$

เมื่อ	W	คือ ลายน้ำต้นแบบ
	W'	คือ ลายน้ำที่ได้จากการคัดแยก
	L_w	คือ ความยาวของสัญญาณลายน้ำ
	w_i	คือ ลายน้ำต้นแบบตำแหน่งที่ i
	w'_i	คือ ลายน้ำที่ได้จากการคัดแยกตำแหน่งที่ i
	$\oplus$	คือ ตัวดำเนินการ Exclusive or (XOR)

7) อัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate, BER) ใช้วัดค่าความผิดพลาดของสัญญาณลายน้ำที่คัดแยกได้ คำนวณได้จาก

$$BER(W, W') = \left(\frac{\sum_{i=1}^{L_w} (w_i \oplus w'_i)}{L_w} \right) \times 100 \quad (3.29)$$

8) Normalized Cross-Correlation (NC) ใช้วัดค่าความคล้ายคลึงกันของสัญญาณลายน้ำต้นแบบและสัญญาณลายน้ำที่ได้จากการคัดแยก คำนวณได้จาก

$$NC(W, W') = \frac{\sum_{k=1}^n w_k w'_k}{\sum_{k=1}^n w_k w_k} \quad (3.30)$$

เมื่อได้ค่าสหสัมพันธ์แล้วจะต้องนำไปเปรียบเทียบกับค่าขีดเริ่มเปลี่ยนที่ได้กำหนดไว้ เพื่อระบุว่าสัญญาณลายน้ำที่คัดแยกมาเป็นสัญญาณลายน้ำที่ได้ถูกฝังเข้าไปหรือไม่

3.6.2 การวัดเชิงคุณภาพ

เป็นวิธีวัดที่มีประสิทธิภาพของการบีบอัดข้อมูลมากที่สุด ทำได้โดยการใช้สายตาของผู้ที่เกี่ยวข้องหรือใช้ภาพนั้น ๆ ซึ่งสามารถที่จะเห็นข้อผิดพลาดเพียงเล็กน้อยที่เกิดกับภาพหลังการบีบอัดได้ และตัดสินใจว่าภาพที่ได้นั้นมีความสามารถที่จะใช้ได้หรือไม่ ถึงแม้ว่าค่าการวัดเชิงปริมาณจะให้ผลดีมาก แต่ถ้าวัดเชิงคุณภาพใช้ไม่ได้ก็จะทำให้ภาพนั้นไม่สามารถนำไปใช้งานได้เช่นกัน

3.7 วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์

ปัญหาหลายอย่างมีความต้องการที่ขัดแย้งกันเนื่องจากปัจจัยของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในระบบทำให้ต้องมีการหาค่าเหมาะสมที่สุด วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์เป็นวิธีการหนึ่งที่ถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางและสามารถที่จะแก้ปัญหาได้เป็นอย่างดี จึงได้นำวิธีการเหล่านั้นมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยด้านการบีบอัดสัญญาณภาพและการฝังลายน้ำ

3.7.1 จินเนติกอัลกอริทึม

จินเนติกอัลกอริทึม (Genetic algorithm, GA) เป็นเทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดวิธีการหนึ่ง โดยอาศัยกลไกทางพันธุศาสตร์ของระบบทางชีววิทยา ที่มีการปรับตัว แข่งขัน วิวัฒนาการและการสืบพันธุ์เพื่อความอยู่รอดมาเป็นเวลาหลายล้านปี วิธีการนี้ถูกคิดค้นโดย John Holland ในปี ค.ศ. 1970 และได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในการแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุด ด้านการเรียนรู้ของคอมพิวเตอร์ หลังจากการตีพิมพ์หนังสือของ Goldberg (1989)

วัฏจักรที่สำคัญของ GA โดยธรรมชาติแล้วจะประกอบไปด้วย 3 กระบวนการหลัก ได้แก่

1) การคัดเลือกสายพันธุ์ (selection) คือ ขั้นตอนในการคัดเลือกประชากรที่ดีในระบบไปเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์เพื่อให้กำเนิดลูกหลานในรุ่นถัดไป

2) ปฏิบัติการทางสายพันธุ์ (genetic operation) คือ กรรมวิธีการเปลี่ยนแปลงโครโมโซมด้วยวิธีการทางสายพันธุ์ เป็นขั้นตอนการสร้างลูกหลานซึ่งได้จากการรวมพันธุ์ เพื่อให้ได้ลูกหลานที่มีส่วนผสมผสานมาจากพ่อแม่หรือได้จากการแปรผกผันของพ่อแม่เพื่อให้ได้ลูกหลานสายพันธุ์ใหม่เกิดขึ้น

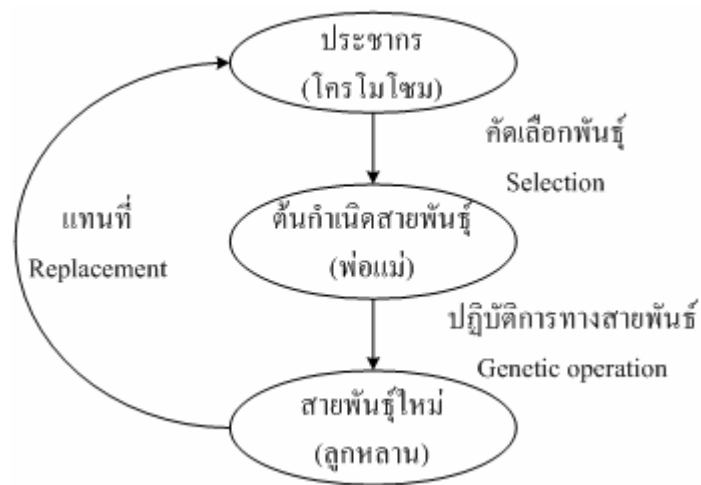
3) การแทนที่ (replacement) คือ ขั้นตอนการนำเอาลูกหลานกำเนิดใหม่ไปแทนที่ประชากรเก่าในรุ่นก่อน เป็นขบวนการในการคัดเลือกกว่าควรจะมีลูกหลานในกลุ่มใดไปแทนประชากรเก่าในกลุ่มใด

จากวัฏจักรของ GA ในรูปที่ 3.13 เป็นการจำลองวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต ซึ่งเป็นกระบวนการในการหาคำตอบของ GA เพื่อให้คำตอบมีวิวัฒนาการจนกลายเป็นคำตอบที่ดีที่สุด รายละเอียดขององค์ประกอบมีดังนี้

1) ประชากร (population) ประกอบไปด้วยกลุ่มของโครโมโซม (chromosome) ซึ่งเป็นตัวแทนของคำตอบในระบบที่ต้องการค้นหา

2) ต้นกำเนิดสายพันธุ์ (parent) กลุ่มประชากรที่ถูกคัดเลือกเพื่อเป็นตัวแทนในการให้กำเนิดสายพันธุ์ใหม่ในรุ่นถัดไป (next generation) ประชากรกลุ่มนี้เปรียบเสมือนกับ “พ่อแม่” สำหรับใช้ในการสืบทอดสายพันธุ์ให้ลูกหลานต่อไป

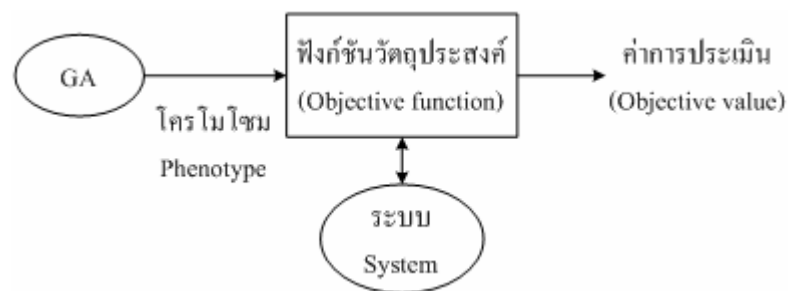
3) สายพันธุ์ใหม่ (offspring) หรือ “ลูกหลาน” เป็นประชากรกลุ่มใหม่ที่ได้รับการถ่ายทอดสายพันธุ์มาจากพ่อแม่โดยคาดหวังที่จะได้รับสายพันธุ์ที่ดีที่สุด เพื่อถ่ายทอดต่อ ๆ กันในประชากรรุ่นถัดไป



รูปที่ 3.13 แผนภาพวัฏจักรของ GA

หลักการทำงานของ GA

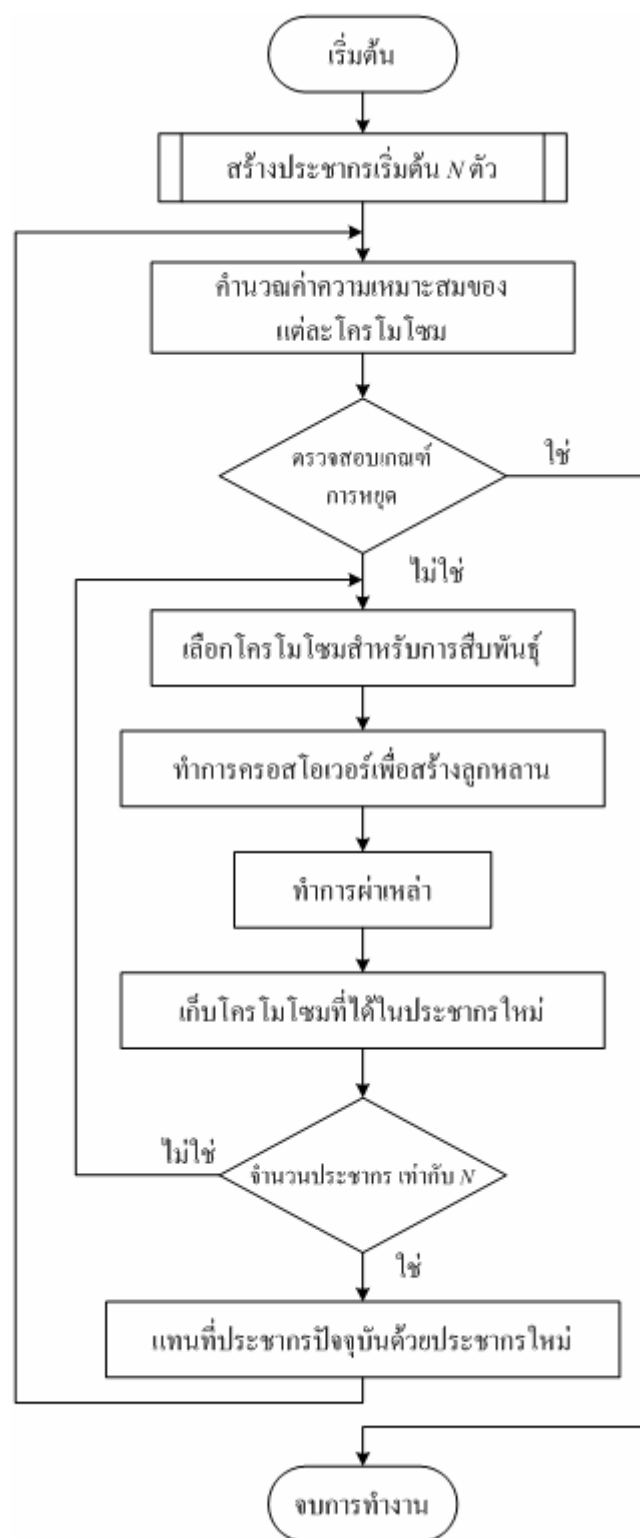
การทำงานของ GA จะเชื่อมต่อกับระบบโดยผ่านทางฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการประเมินค่าประชากร ดังรูปที่ 3.14 (Srikaew A., 2002) จากนั้นนำค่าความเหมาะสมกลับไปใช้ในการเลือกประชากรในกลไกของ GA ต่อไป ซึ่งกลไกพื้นฐานของ GA เป็นดังรูปที่ 3.15 (Negnevitsky, 2002)



รูปที่ 3.14 การเชื่อมต่อกันระหว่าง GA กับระบบ

ขั้นตอนการทำงานของ GA จากรูปที่ 3.15 มีรายละเอียดดังนี้

- 1) กำหนดให้โดเมนของปัญหาเป็นโครโมโซม และเลือกขนาดของประชากรเท่ากับ N ตัว ความน่าจะเป็นของการครอสโอเวอร์เท่ากับ P_c และความน่าจะเป็นของการผ่าเหล่าเท่ากับ P_m
- 2) นิยามฟังก์ชันค่าความเหมาะสมเพื่อวัดประสิทธิภาพหรือความเหมาะสมของประชากรแต่ละตัว
- 3) สร้างประชากรเริ่มต้นขนาด N ตัว โดยทั่วไปใช้การสุ่ม $x_1, x_2, \dots, x_N$
- 4) คำนวณค่าความเหมาะสมของประชากรแต่ละตัว $f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_N)$
- 5) เลือกคู่โครโมโซมเพื่อใช้ในการสืบพันธุ์จากประชากรรุ่นปัจจุบัน โดยโครโมโซมจะถูกเลือกจากความน่าจะเป็นซึ่งประเมินจากค่าความเหมาะสม ประชากรที่มีความเหมาะสมมากก็จะมีโอกาสที่จะถูกเลือกมากเช่นกัน
- 6) สร้างคู่โครโมโซมของลูกหลานโดยใช้ปฏิบัติการทางสายพันธุ์ นั่นคือการทำครอสโอเวอร์และการผ่าเหล่า
- 7) เก็บโครโมโซมลูกหลานเป็นประชากรตัวใหม่และทำซ้ำขั้นตอนที่ 5 จนกระทั่งขนาดของประชากรใหม่เท่ากับ N ตัว
- 8) แทนที่ประชากรเริ่มต้น (parent) ด้วยประชากรใหม่ (offspring)
- 9) ไปที่ขั้นตอนที่ 4 และทำซ้ำกระบวนการเดิมจนกระทั่งถึงเกณฑ์ความพอใจการหยุด



รูปที่ 3.15 ขั้นตอนการทำงานของ GA

3.7.2 การค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

การค้นหาแบบตามู (TS) ถูกคิดค้นโดย Glover ในปี ค.ศ. 1986 เพื่อใช้ในการแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุดแบบคอมบินาทอเรียล โดยใช้หลักการค้นหาจากเซตข้างเคียงของจุดคำตอบ (neighborhood) และการกำหนดตามูลิสต์ (tabu list) ซึ่งจะบันทึกตำแหน่งการเดินในแต่ละครั้งไว้เพื่อใช้ในการกำหนดทิศทางการเดินในกรณีที่ไม่เจอคำตอบเป็นเวลานานหรือติดกับดักของคำตอบแบบเฉพาะถิ่น (Local optimum) ทำให้สามารถค้นหาคำตอบแบบวงกว้าง (Global optimum) ได้ จึงได้มีผู้นำมาใช้ในการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดหลายด้าน เช่น ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูริเยร์ในแบบจำลองกระแสฮาร์โมนิกและการออกแบบรูปการสวิตช์ (Wuttinatenatiruk C. and Oonsivilai A., 2003) การหาค่าเหมาะสมของน้ำหนักประสาของระบบโครงข่ายประสาทเทียม (Yi He et al., 2005) หรือการนำตามูไปใช้ในการแก้ปัญหาด้านการขนส่ง (Minghe Sun, 1998) เป็นต้น

องค์ประกอบของวิธีการค้นหาแบบตามูที่แตกต่างจากวิธีค้นหาแบบอื่น ๆ คือ มีเกณฑ์ความเป็นตามู (tabu list criterion) และเกณฑ์ความปรารถนา (aspiration criterion) (Areerak K-N. and Sujitjorn S., 2002)

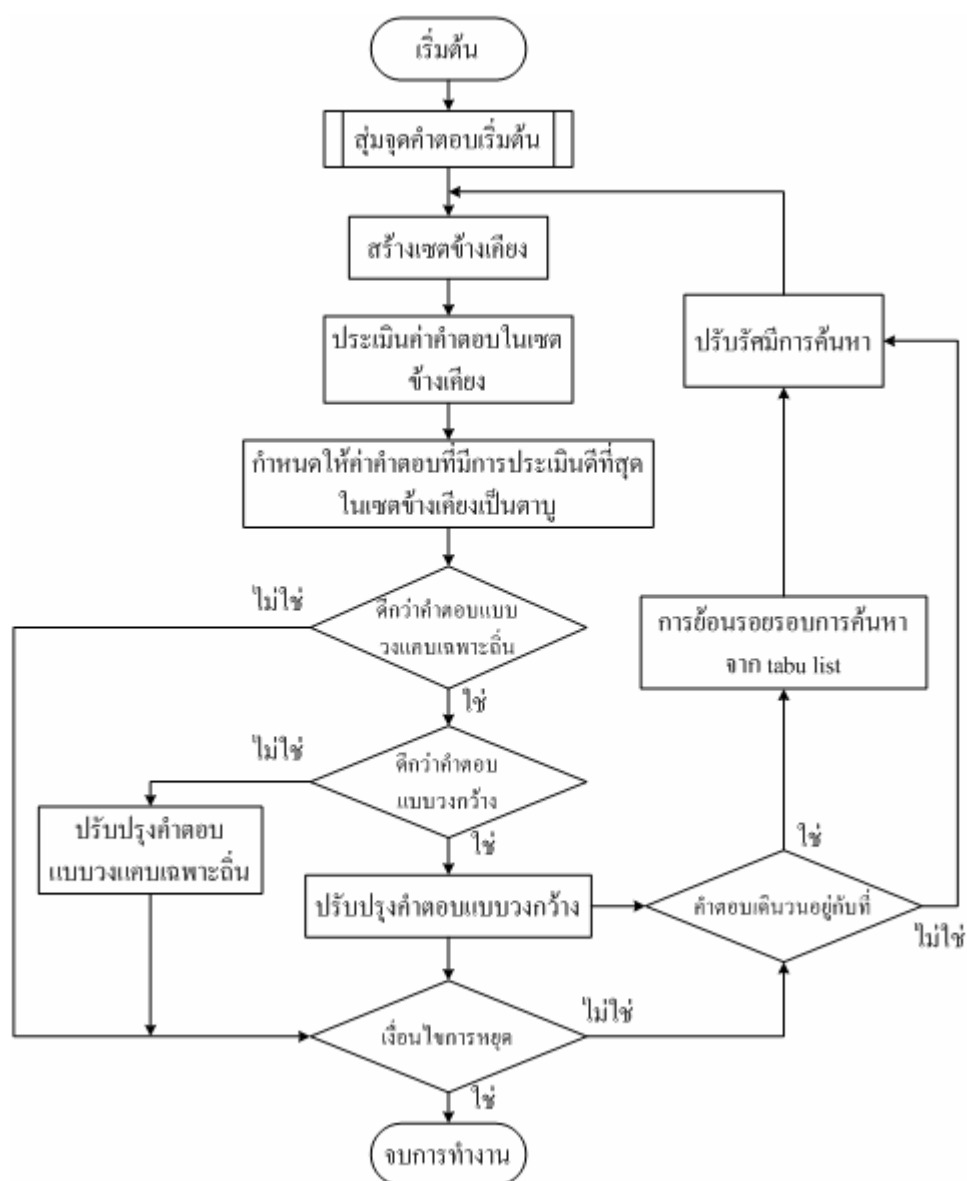
เกณฑ์ความเป็นตามู เป็นส่วนที่คอยเก็บข้อมูลของคำตอบในอดีตของกระบวนการค้นหานั้น ๆ เพื่อเป็นตัวกำหนดการค้นหาคำตอบว่าจะมีทิศทางไปทางใด หลักการออกแบบเกณฑ์ความเป็นตามูจะมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไปขึ้นกับปัญหาแต่ละชนิด

เกณฑ์ความปรารถนา เป็นเงื่อนไขที่อาจจะต้องใช้ในบางครั้งเมื่อจำเป็นต้องเลือกคำตอบที่อยู่ในเกณฑ์ความเป็นตามู งานบางชนิดที่ปัญหาไม่ซับซ้อนไม่จำเป็นต้องฟังส่วนนี้ก็ได้

นอกจากนี้ในช่วงปี ค.ศ. 2000-2005 คณะนักวิจัยสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้ร่วมกันพัฒนาเทคนิคการค้นหาตามูเชิงปรับตัว (Adaptive Tabu Search, ATS) โดยเพิ่มกลไกการเดินย้อนรอย (back tracking) และกลไกการปรับรัศมีการค้นหา (adaptive radius) ซึ่งมีการนำไปประยุกต์ใช้ในหลายด้าน เช่น การระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลองระบบ (Puangdownreong D. et al., 2002) การระบุเอกลักษณ์องค์ประกอบของฮาร์โมนิกสำหรับตัวกรองกำลังแอกทีฟเพื่อให้มีความแม่นยำเที่ยงตรงมากขึ้น (Kulworawanichpong T. et al., 2004) และการใช้ ATS ในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PID เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด (Puangdownreong D. and Sujitjorn S., 2007) เป็นต้น

การเดินย้อนรอย เป็นขั้นตอนที่อนุญาตให้ระบบค้นหาค้นหาพื้นที่คำตอบที่เคยถูกค้นหามาแล้วในช่วงหนึ่งเพื่อให้เป็นจุดเริ่มต้นของการค้นหา ซึ่งไม่จำเป็นจะต้องเป็นคำตอบที่ดีกว่าพื้นที่ที่ผ่านมาก็ได้ ซึ่งกระบวนการนี้จะทำให้การค้นหามีโอกาสที่จะหลุดจากกับดักคำตอบแบบวงแคบเฉพาะถิ่นได้

การปรับรัศมีการค้นหา เป็นกระบวนการที่ทำการลดรัศมีการค้นหา ซึ่งการลดจะดำเนินการไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งการค้นหาเข้าใกล้คำตอบที่ดีที่สุดแบบวงกว้าง รัศมีการค้นหาที่กว้างจะให้ผลการค้นหาที่หยาบซึ่งอาจทำให้การค้นหาพลาดคำตอบที่ต้องการได้ ในทางตรงกันข้ามถ้ารัศมีการค้นหาคำตอบมีขนาดเล็ก การค้นหาคำตอบจะต้องใช้เวลานานขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นรัศมีการค้นหาคำตอบที่เล็กมาก ๆ อาจทำให้ระบบไม่สามารถครอบคลุมพื้นที่ของคำตอบที่ต้องการค้นหาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นการปรับรัศมีการค้นหาให้เหมาะสมจึงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการค้นหาได้ รูปที่ 3.16 แสดงแผนผังการทำงานของ ATS



รูปที่ 3.16 แผนผังการทำงานของ ATS

3.8 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของการแปลงมัลติเวฟเลตซึ่งมีความแตกต่างจากการแปลงเวฟเลตที่จำนวนของฟังก์ชันย่อ-ขยายและฟังก์ชันเวฟเลตมีมากกว่า 1 ฟังก์ชัน ทำให้มูลฐานของมัลติเวฟเลตสามารถมีคุณสมบัติต่างจาก คุณสมบัติสมมาตร คุณสมบัติการประมาณอันดับสองและคุณสมบัติ compact support พร้อมกัน ซึ่งไม่สามารถเกิดขึ้นได้ในมูลฐานของเวฟเลต นอกจากนี้ได้นำเสนอหลักการบีบอัดสัญญาณภาพเบื้องต้น ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก คือ การบีบอัดสัญญาณภาพแบบไม่มีการสูญเสียและการบีบอัดสัญญาณภาพแบบมีการสูญเสีย โดยการบีบอัดสัญญาณภาพที่ได้รับความนิยมจะเป็นแบบมีการสูญเสีย เนื่องจากสามารถบีบอัดที่อัตราการบีบอัดสูงทำให้ได้ขนาดของข้อมูลเล็กและยังไม่สามารถสังเกตเห็นส่วนของข้อมูลที่หายไปได้ วิธีการหนึ่งที่รู้จักกันเป็นอย่างดี คือ การบีบอัดสัญญาณภาพแบบ SPIHT ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพรวดเร็วและขั้นตอนไม่ซับซ้อนมาก โดยวิธีนี้จะอาศัยความสัมพันธ์แบบซีโรทรีช่วยในการเข้ารหัส นอกจากนี้ยังได้อธิบายถึงโครงสร้างของการฝังลายน้ำเพื่อเป็นแนวทางในการรวมกระบวนการบีบอัดสัญญาณภาพและการฝังลายน้ำเข้าด้วยกัน จากนั้นเพื่อประเมินประสิทธิภาพจึงได้นำเสนอค่าที่ใช้ในการวัดผลของการบีบอัดสัญญาณภาพและการฝังลายน้ำ สุดท้ายได้กล่าวถึงหลักการทำงานของจินเนติกอัลกอริทึมและการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวเพื่อนำไปใช้ในการค้นหาพารามิเตอร์ของการฝังลายน้ำต่อไป

บทที่ 4

ผลของการแปลงสัญญาณภาพต่ออัลกอริทึม การบีบอัดสัญญาณภาพและการฝังลายน้ำ

4.1 กล่าวนำ

อัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณภาพส่วนใหญ่จะทำการเข้ารหัสของสัมประสิทธิ์การแปลง ซึ่งจะทำให้การบีบอัดมีประสิทธิภาพสูง การฝังลายน้ำดิจิทัลสามารถจำแนกออกเป็นโดเมนเวลา และโดเมนการแปลง โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การฝังลายน้ำในโดเมนการแปลงให้ผลดีกว่าในโดเมนเวลา และเมื่อพิจารณาถึงกระบวนการทั้งสองแล้วจะเห็นว่าจะต้องใช้กระบวนการแปลงสัญญาณภาพเช่นเดียวกันทำให้สามารถรวมทั้งสองเข้าด้วยกัน ดังนั้นในบทนี้จึงได้ศึกษาผลกระทบของการแปลงสัญญาณภาพซึ่งประกอบด้วยการแปลงเวฟเล็ตและการแปลงมัลติเวฟเล็ต โดยใช้ อัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำแบบเดียวกัน ประสิทธิภาพของการแปลงสัญญาณภาพแต่ละวิธีจะถูกรวบรวมในทอมของคุณภาพของภาพและความทนทานของสัญญาณลายน้ำ ในหัวข้อที่ 4.2 จะได้กล่าวถึงรายละเอียดของขั้นตอนการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำที่ใช้ในการทดสอบ หัวข้อที่ 4.3 เป็นการนำเสนอผลของการทดสอบกับภาพตัวอย่าง และในหัวข้อที่ 4.4 เป็นการสรุปผลที่ได้จากการทดสอบดังกล่าว

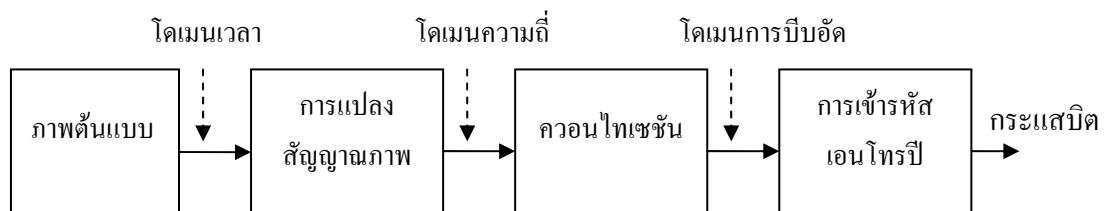
4.2 การบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำ

การฝังลายน้ำในสัญญาณภาพดิจิทัลเป็นการป้องกันการละเมิดลิขสิทธิ์ของข้อมูลภาพโดยการซ่อนข้อมูลที่เหมาะสมเข้าไปในภาพต้นแบบ ซึ่งกระบวนการนี้จะต้องไม่ทำให้คุณภาพของภาพลดลงมากนักและข้อมูลที่ฝังเข้าไปจะต้องไม่สามารถกำจัดออกไปได้ โดยทั่วไปการฝังลายน้ำดิจิทัลสามารถแบ่งตามโดเมนการฝังลายน้ำได้ 2 ประเภท คือ โดเมนเวลาและโดเมนการแปลง ซึ่งในแต่ละโดเมนจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน หรืออาจแบ่งตามความสามารถของการมองเห็นก็สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทเช่นกัน คือ แบบสามารถมองเห็นได้ เช่น เครื่องหมายทางการค้า สัญลักษณ์ของสถานีโทรทัศน์ เป็นต้น ซึ่งจะทำให้คุณภาพของข้อมูลนั้นลดลง และแบบไม่สามารถมองเห็นได้ ซึ่งเมื่อฝังเข้าไปแล้วจะไม่สามารถสังเกตเห็นได้ เมื่อทำการตรวจสอบต้องทำการคัดแยกสัญญาณลายน้ำออกมาด้วยอัลกอริทึมที่ใช้ จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ารูปแบบการฝังลายน้ำที่ใช้โดเมนการแปลงจะให้ความทนทานของสัญญาณลายน้ำต่อการโจมตีจากสัญญาณรบกวน

การประมวลผลสัญญาณภาพพื้นฐาน และการบีบอัดสัญญาณภาพได้ดีกว่ารูปแบบที่ใช้การฝังลายน้ำในโดเมนเวลา

การบีบอัดสัญญาณภาพดิจิทัลเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญก่อนที่จะนำภาพไปประยุกต์ใช้ในด้านอื่น ๆ โดยจุดประสงค์หลักของการบีบอัดสัญญาณภาพ คือ การลดความต้องการของหน่วยความจำที่ใช้ในการจัดเก็บข้อมูลลง แต่ยังคงรักษาคุณภาพของภาพหลังการบีบอัดไว้นั่นเอง เครื่องมือที่สำคัญอย่างหนึ่งในการช่วยทำให้การบีบอัดสัญญาณภาพมีอัตราการบีบอัดที่สูง แต่ให้คุณภาพของภาพที่ดี คือ การแปลงสัญญาณภาพ ซึ่งการแปลงสัญญาณภาพที่นิยมใช้กัน เช่น การแปลงโคไซน์ การแปลงเวฟเลตและการแปลงมัลติเวฟเลต เป็นต้น

เนื่องจากกระบวนการทั้งสองที่กล่าวมานั้นมีขั้นตอนบางอย่างที่เหมือนกัน ทำให้มีการหาวิธีที่จะรวมอัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณภาพและการฝังลายน้ำเข้าด้วยกัน งานวิจัยของ Ya-fei et al. (2001) และ Grosbois and Ebrahimi (2003) ได้พัฒนาวิธีการรวมการฝังลายน้ำกับการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG และ JPEG2000 ตามลำดับ โดยวิธีนี้ให้ผลการทดลองที่ดีแต่มีกระบวนการที่ซับซ้อนมาก นอกจากนี้ Yang, Chang, and Chen (2001) ได้นำเสนออัลกอริทึมการฝังลายน้ำรวมกับการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ SPIHT ซึ่งการฝังลายน้ำจะฝังในโดเมนการบีบอัด ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 โดเมนของการฝังลายน้ำ

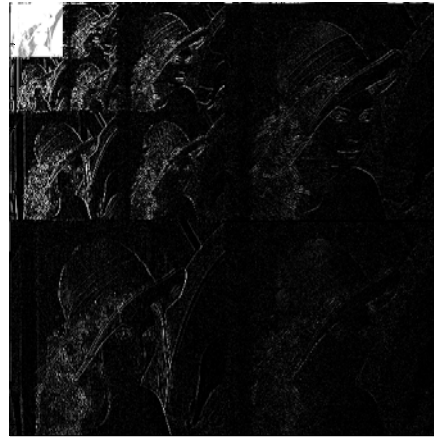
บทนี้ได้ศึกษาผลกระทบของการแปลงสัญญาณภาพประกอบด้วย การแปลง DWT และ DMT สำหรับใช้ในอัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำที่นำเสนอโดย Yang, Chang, and Chen (2001) การฝังลายน้ำจะดำเนินการในขั้นตอน refinement pass ของการเข้ารหัส โดยการแก้ไขบิตที่ส่งออกด้วยสัญญาณลายน้ำ

4.2.1 วิธีการแปลงสัญญาณภาพ

การแปลง DWT กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในการนำไปประยุกต์ใช้ในหลาย ๆ ด้านและกลายเป็นเครื่องมือสำคัญในด้านการประมวลผลภาพอีกด้วย เช่น การบีบอัดสัญญาณภาพและการฝังลายน้ำ เป็นต้น วัตถุประสงค์หลักของการแปลงเวฟเล็ตก็เพื่อแยกองค์ประกอบของสัญญาณออกเป็นส่วนของความถี่ต่ำและความถี่สูง โดยคุณสมบัติที่ต้องการของเวฟเล็ตมูลฐาน คือ คุณสมบัติการตั้งฉาก การสมมาตร การประมาณค่า สำหรับการแยกองค์ประกอบเวฟเล็ต p ระดับ จะได้แบนด์ย่อยออกมาทั้งหมด $(3p+1)$ แบนด์ย่อย ดังรูปที่ 4.2 เป็นการแยกองค์ประกอบเวฟเล็ต 3 ระดับโดยใช้เวฟเล็ตแม่ตระกูล Daubechies 4



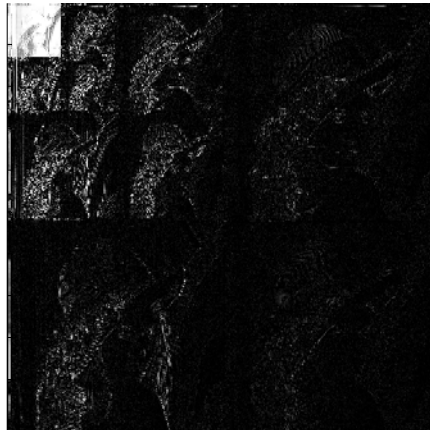
(ก) ภาพต้นแบบ Lena



(ข) ภาพแบนด์ย่อยของภาพ Lena

รูปที่ 4.2 ภาพแบนด์ย่อยจากการแยกองค์ประกอบเวฟเล็ต 3 ระดับ

การแปลงมัลติเวฟเล็ตมีแนวคิดคล้ายกับการแปลงเวฟเล็ต แต่มีข้อแตกต่างกันที่เวฟเล็ตจะมีฟังก์ชันสเกลลิงและฟังก์ชันเวฟเล็ตเพียงฟังก์ชันเดียว แต่มัลติเวฟเล็ตจะมีตั้งแต่ 2 ฟังก์ชันขึ้นไป และสามารถมีคุณสมบัติหลายอย่างได้พร้อมกัน รูปที่ 4.3 เป็นภาพแบนด์ย่อยของการแยกองค์ประกอบมัลติเวฟเล็ตโดยใช้ DGHM มัลติเวฟเล็ตและใช้ตัวกรองก่อนจาก Attakitmongkol K., Hardin, and Wilkes (2001)



รูปที่ 4.3 ภาพแบนด์ย่อยจากการแยกองค์ประกอบมัลติเวฟเล็ด 3 ระดับ

4.2.2 รูปแบบการบีบอัดสัญญาณภาพที่ใช้ในการทดสอบ

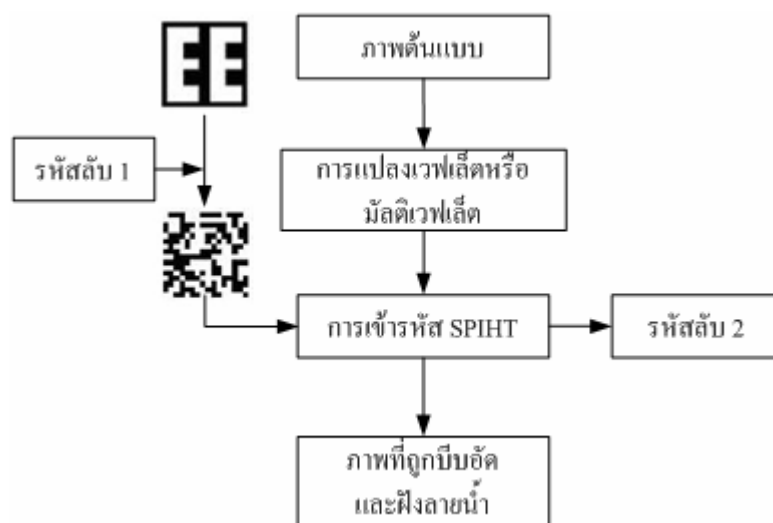
Shapiro (1993) ได้นำเสนอวิธีการเข้ารหัสภาพแบบ Embedded Zerotree Wavelet (EZW) โดยใช้โครงสร้างที่เรียกว่า ซีโรทรี (zerotree) จากการแยกองค์ประกอบเวฟเล็ดของภาพ ซึ่งสัมพันธ์กับการแปลงในแต่ละแบนด์ย่อยจะมีความสัมพันธ์กัน ต่อมา Said and Pearlman (1996) ได้พัฒนาวิธีการบีบอัดสัญญาณภาพที่เรียกว่า SPIHT โดยใช้หลักการของ EZW แต่มีความง่ายและรวดเร็วกว่า โดยลักษณะสำคัญอย่างหนึ่งของการเข้ารหัส SPIHT คือ การส่งข้อมูลไปข้างหน้า (progressive transmission) ซึ่งเป็นการเลือกข้อมูลที่มีความสำคัญเพื่อส่งหรือจัดเก็บไว้เป็นอันดับแรก ดังนั้น อัลกอริทึมที่ใช้ในการกำหนดความสำคัญของสัมประสิทธิ์การแปลงจึงมีความสำคัญสำหรับการเข้ารหัสรูปแบบนี้ จากนั้นกระบวนการเข้ารหัสจะดำเนินไปจนกระทั่งได้จำนวนบิตตามที่ต้องการจึงหยุดการวนรอบ

4.2.3 อัลกอริทึมการฝังลายน้ำ

รูปแบบการฝังลายน้ำที่ใช้ในการทดสอบจะใช้วิธีการของ Yang, Chang, and Chen (2001) แสดงได้ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งมีขั้นตอนการฝัง ดังนี้

- 1) เตรียมสัญญาณลายน้ำจากภาพลายน้ำแบบขาวดำ จากนั้นทำการสับเปลี่ยนตำแหน่งภาพขาวดำนั้นโดยใช้รหัสลับเพื่อสร้างลำดับไบนารี
- 2) แปลงสัญญาณภาพต้นแบบด้วยการแปลงเวฟเล็ดหรือการแปลงมัลติเวฟเล็ด
- 3) เข้ารหัส SPIHT และแทรกสัญญาณลายน้ำโดยการแทนที่รหัสต้นแบบที่ได้จากการส่งออกค่าบิตด้วยบิตของลำดับลายน้ำไบนารีของสัมประสิทธิ์ที่มีความสำคัญ ซึ่งพิจารณาจากขนาดของสัมประสิทธิ์ที่มากกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยนในขั้นตอน refinement pass ของอัลกอริทึมการบีบอัด

- 4) เก็บตำแหน่งการฝังไว้เพื่อใช้ในกระบวนการตรวจจับลายน้ำ
- 5) จัดเก็บข้อมูลที่ถูกบีบอัดและฝังลายน้ำ ซึ่งจะมีขนาดขึ้นอยู่กับอัตราการบีบอัด
- 6) ขั้นตอนในการสร้างกลับสัญญาณภาพ เริ่มจากการถอดรหัส SPIHT จากนั้นแปลงกลับสัญญาณภาพด้วยการแปลงที่ใช้ในข้อ 2) ก็จะได้ภาพหลังการบีบอัดสัญญาณภาพและฝังลายน้ำ



รูปที่ 4.4 แผนภาพขั้นตอนการเข้ารหัสและฝังลายน้ำ

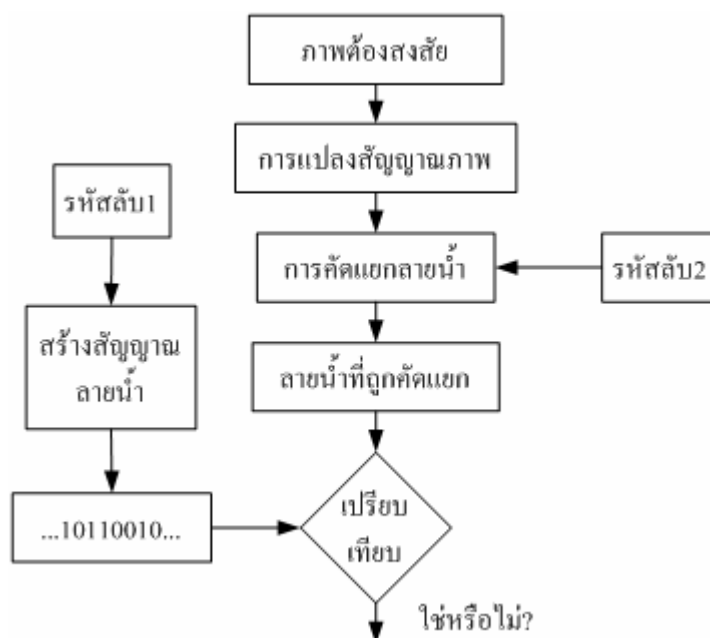
4.2.4 การคัดแยกลายน้ำ

สำหรับขั้นตอนการคัดแยกลายน้ำนั้น เริ่มจากการแปลงภาพต้องสงสัยด้วยการแปลงเวฟเลตหรือการแปลงมัลติเวฟเลต จากนั้นนำสัมประสิทธิ์การแปลงเข้ารหัส SPIHT และใช้รหัสลับที่ได้จากขั้นตอนการฝังลายน้ำช่วยในการคัดแยกด้วย ก็จะสามารถที่จะคัดแยกลายน้ำได้ และนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณลายน้ำต้นแบบโดยการวัดค่าความเหมือนซึ่งในที่นี้ใช้ค่าอัตราความผิดพลาดบิต (BER) ซึ่งจะบ่งบอกถึงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของสัญญาณลายน้ำที่คัดแยกออกมาได้ว่ามีความผิดพลาดมากน้อยเพียงใด แสดงได้ดังรูปที่ 4.5

หลังจากการฝังสัญญาณลายน้ำแล้วทำการทดสอบความทนทานของสัญญาณลายน้ำ โดยการโจมตีด้วยการประมวลผลสัญญาณภาพพื้นฐาน เช่น การบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG การกรองแบบค่ามัธยฐาน การกรองแบบค่าผ่านและการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน เป็นต้น

4.3 ผลการทดสอบ

เพื่อแสดงถึงผลกระทบของการแปลงสัญญาณภาพต่อรูปแบบการฝังลายน้ำในโดเมนการบีบอัดซึ่งประกอบไปด้วย การแปลงเวฟเลตและการแปลงมัลติเวฟเลต การทดลองใช้ภาพทดสอบจำนวน 3 ภาพ คือ ภาพ “Lena”, “Barbara” และ “Boat” ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 512×512 จุดภาพ และเป็นภาพระดับเทา 256 ระดับ (8 bpp) นำไปทำการแปลงสัญญาณภาพทั้งหมด 5 ระดับ หลังจากนั้นนำสัมประสิทธิ์การแปลงที่ได้ไปเข้ารหัส SPIHT ที่อัตราบิตเท่ากับ 0.3 bpp สำหรับภาพ “Lena” กับภาพ “Boat” และอัตราบิตเท่ากับ 0.5 bpp สำหรับภาพ “Barbara” ซึ่งการทดสอบนี้จะไม่ใช้การเข้ารหัสเลขคณิต ในการวัดประสิทธิภาพของการแปลงสัญญาณภาพแต่ละแบบจะใช้ค่า *PSNR* และค่า *BER* เพื่อประเมินคุณภาพของภาพและความทนทานของสัญญาณลายน้ำ ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 แผนภาพขั้นตอนการตรวจจับลายน้ำ

การแปลงเวฟเลตจะใช้เวฟเลตแม่ตระกูล Daubechies-4 และการแปลงมัลติเวฟเลตใช้ DGHM มัลติเวฟเลต เนื่องจากมีการประมาณค่าอันดับสองเหมือนกัน สัญญาณลายน้ำเป็นแบบภาพขาวดำขนาดเท่ากับ 16×16 เมื่อทำการสับเปลี่ยนตำแหน่งด้วยรหัสลับจะได้ดังรูปที่ 4.6 และกำหนดให้ค่าขีดเริ่มเปลี่ยนของการฝังลายน้ำเท่ากับ 256



(ก) ภาพลายน้ำต้นแบบ

(ข) ภาพหลังการสับเปลี่ยนตำแหน่ง

รูปที่ 4.6 สัญญาณลายน้ำแบบภาพขาวดำ

ค่า $PSNR$ ของภาพหลังการบีบอัดโดยไม่มีการฝังลายน้ำและภาพหลังการบีบอัดพร้อมกับถูกฝังลายน้ำแสดงได้ดังตารางที่ 4.1 ภาพต้นแบบและภาพที่ถูกฝังลายน้ำของภาพ “Lena”, “Boat” และ “Barbara” โดยใช้การแปลงเวฟเล็ตและการแปลงมัลติเวฟเล็ตแสดงได้ดังรูปที่ 4.7 รูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 ตามลำดับ จากการทดสอบพบว่าอัลกอริทึมที่ใช้ DMT ให้ผลของคุณภาพของภาพหลังการฝังลายน้ำดีกว่าอัลกอริทึมที่ใช้ DWT ที่อัตราบิดเดียวกัน ความทนทานของสัญญาณลายน้ำหลังถูกโจมตีด้วยการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG โดยการแปรค่า quality factor แสดงได้ดังตารางที่ 4.2 สำหรับอัลกอริทึมที่ใช้ DWT และตารางที่ 4.3 สำหรับอัลกอริทึมที่ใช้ DMT ซึ่งจะเห็นว่าวิธีการที่ใช้ DMT ให้ความทนทานของสัญญาณลายน้ำดีกว่าการใช้ DWT

ตารางที่ 4.1 คุณภาพของภาพวัดโดยใช้ค่า $PSNR$ (dB)

ภาพ	เวฟเล็ต		มัลติเวฟเล็ต	
	SPIHT ไม่ฝังลายน้ำ	SPIHT และฝังลายน้ำ	SPIHT ไม่ฝังลายน้ำ	SPIHT และฝังลายน้ำ
Lena	33.19	32.26	33.72	32.72
Boat	30.23	29.67	30.60	30.03
Barbara	30.17	29.64	31.06	30.37

ตารางที่ 4.2 ลายน้ำที่ถูกคัดแยกและค่า BER จากอัลกอริทึมที่ใช้ DWT หลังถูกโจมตีด้วยการบีบอัด
สัญญาณภาพแบบ JPEG

Q.F. (%)	ภาพ					
	Lena		Boat		Barbara	
	ลายน้ำ	BER (%)	ลายน้ำ	BER (%)	ลายน้ำ	BER (%)
10		16.797		9.766		16.016
20		7.031		1.563		5.859
30		2.734		0.391		1.563
40		1.172		0		1.172
50		0.391		0		0.391
60		0		0		0

ตารางที่ 4.3 ลายน้ำที่ถูกคัดแยกและค่า BER จากอัลกอริทึมที่ใช้ DMT หลังถูกโจมตีด้วยการบีบอัด
สัญญาณภาพแบบ JPEG

Q.F. (%)	ภาพ					
	Lena		Boat		Barbara	
	ลายน้ำ	BER (%)	ลายน้ำ	BER (%)	ลายน้ำ	BER (%)
10		15.625		5.859		19.531
20		5.078		0		3.906
30		1.562		0.391		1.172
40		0		0		0
50		0		0		0
60		0		0		0



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.7 ภาพ “Lena” หลังการบีบอัดและฝังลายน้ำโดยใช้ (ก) DWT (ข) DMT



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.8 ภาพ “Boat” หลังการบีบอัดและฝังลายน้ำโดยใช้ (ก) DWT (ข) DMT



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.9 ภาพ “Barbara” หลังการบีบอัดและฝังลายน้ำโดยใช้ (ก) DWT (ข) DMT

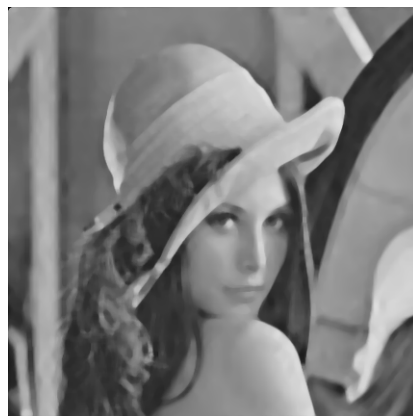
นอกจากนี้ยังได้ทำการโจมตีด้วยการประมวลผลสัญญาณภาพพื้นฐานดังรูปที่ 4.10 ซึ่งประกอบด้วย การกรองแบบค่ามัธยฐานขนาด 3×3 การกรองแบบต่ำผ่านขนาด 3×3 และการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน โดยแปรค่าความแปรปรวนจาก 100 ถึง 500 ตารางที่ 4.4 และตารางที่ 4.6 แสดงค่า *BER* ของลายน้ำที่ได้จากการคัดแยกหลังการถูกโจมตีของภาพที่ใช้การแปลง DWT ผลของอัลกอริทึมที่ใช้ DMT หลังการถูกโจมตีแสดงดังตารางที่ 4.5 และตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.4 ลายน้ำที่ถูกคัดแยกและค่า *BER* จากอัลกอริทึมที่ใช้ DWT หลังถูกโจมตีด้วยการกรองชนิดต่าง ๆ ขนาด 3×3

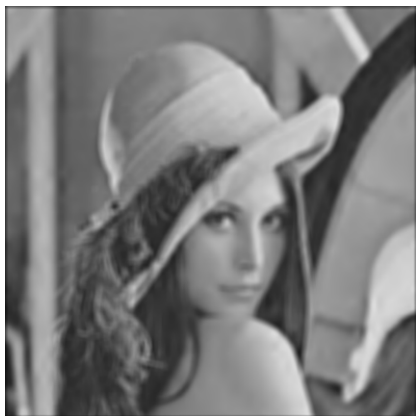
ชนิด การกรอง	ภาพ					
	Lena		Boat		Barbara	
	ลายน้ำ	<i>BER</i> (%)	ลายน้ำ	<i>BER</i> (%)	ลายน้ำ	<i>BER</i> (%)
แบบค่ามัธยฐาน		13.281		18.750		12.891
แบบต่ำผ่าน		17.969		26.953		12.891



(ก) ภาพจากการบีบอัดแบบ JPEG



(ข) ภาพจากการกรองแบบค่ามัธยฐาน



(ค) ภาพจากการกรองแบบค่าผ่าน



(ง) ภาพจากการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน

รูปที่ 4.10 ภาพที่ส่งลายน้หลังการถูกโจมตีแบบต่าง ๆ

ตารางที่ 4.5 ลายน้ที่ถูกคัดแยกและค่า BER จากอัลกอริทึมที่ใช้ DMT หลังถูกโจมตีด้วยการกรองชนิดต่าง ๆ ขนาด 3×3

ชนิด การกรอง	ภาพ					
	Lena		Boat		Barbara	
	ลายน้	BER (%)	ลายน้	BER (%)	ลายน้	BER (%)
แบบค่ามัธยฐาน		4.688		5.078		12.109
แบบค่าผ่าน		13.281		17.188		12.500

จากผลการทดสอบจะเห็นว่า ภาพหลังการฝังลายน้ำที่ถูกโจมตีโดยการกรองแบบต่ำผ่าน และการกรองแบบค่ามัธยฐานของอัลกอริทึมที่ใช้การแปลง DMT มีความทนทานของสัญญาณลายน้ำดีกว่าการใช้ DWT เช่นกัน สำหรับกรณีของการโจมตีด้วยการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียนยังไม่สามารถที่จะสรุปได้แน่ชัดว่าการแปลงชนิดใดให้ผลความทนทานดีกว่า

ตารางที่ 4.6 ลายน้ำที่ถูกคัดแยกและค่า BER จากอัลกอริทึมที่ใช้ DWT หลังถูกโจมตีด้วยการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน

ค่าความ แปรปรวน	ภาพ					
	Lena		Boat		Barbara	
	ลายน้ำ	BER (%)	ลายน้ำ	BER (%)	ลายน้ำ	BER (%)
100		2.734		0.000		0.781
200		7.031		0.391		4.688
300		9.766		2.734		7.813
400		9.766		4.688		10.547
500		12.11		6.250		13.281

ตารางที่ 4.7 ลายน้ำที่ถูกคัดแยกและค่า BER จากอัลกอริทึมที่ใช้ DMT หลังถูกโจมตีด้วยการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน

ค่าความ แปรปรวน	ภาพ					
	Lena		Boat		Barbara	
	ลายน้ำ	BER (%)	ลายน้ำ	BER (%)	ลายน้ำ	BER (%)
100		1.172		0.391		3.516
200		5.469		1.563		7.031
300		7.031		5.469		8.594
400		8.984		6.250		11.719
500		9.766		8.594		14.453

4.4 สรุป

จากการศึกษาผลกระทบของการแปลงสัญญาณภาพต่ออัลกอริทึมการฝังลายน้ำในโดเมนการบีบอัด ซึ่งเป็นวิธีการที่ให้ประโยชน์ทั้งในด้านของการลดขนาดของพื้นที่ในการจัดเก็บและการป้องกันการละเมิดลิขสิทธิ์ในเวลาเดียวกัน การแปลงสัญญาณภาพที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบด้วย การแปลงเวฟเล็ตและการแปลงมัลติเวฟเล็ต ซึ่งเป็นการแปลงที่ได้มีการนำไปใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยใช้อัลกอริทึมที่นำเสนอโดย Yang, Chang, and Chen (2001) ในการทดสอบเหมือนกัน อัลกอริทึมนี้เป็นการฝังลายน้ำที่ใช้รูปแบบการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ SPIHT โดยการดัดแปลงบิตที่ได้จากขั้นตอนการทำ refinement pass ผลการทดสอบกับภาพตัวอย่างจำนวนหลายภาพพบว่า อัลกอริทึมที่ใช้การแปลงมัลติเวฟเล็ตให้คุณภาพของภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำดีกว่า อัลกอริทึมที่ใช้การแปลงเวฟเล็ตที่อัตราบิตเดียวกัน นอกจากนี้ยังได้ทดสอบความทนทานของสัญญาณลายน้ำโดยการโจมตีด้วยการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG การกรองแบบค่ามัธยฐานและการกรองแบบต่ำผ่าน พบว่าอัลกอริทึมที่ใช้การแปลงมัลติเวฟเล็ตมีความทนทานดีกว่าการใช้การแปลงเวฟเล็ต

บทที่ 5

การฝังลายน้ำในโดเมนการบีบอัด

5.1 กล่าวนำ

จากการเล็งเห็นประโยชน์ของการบีบอัดสัญญาณภาพและการฝังลายน้ำดิจิทัล จึงได้มีการรวมวิธีการรวมทั้งสองเข้าด้วยกันหรือเรียกว่าเป็นการฝังลายน้ำในโดเมนการบีบอัดนั่นเอง ซึ่งมีด้วยกันหลายวิธี แต่จากปริทัศน์วรรณกรรมยังไม่มีการนำการแปลงมัลติเวฟเล็ดไปใช้กับการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำ จากบทที่แล้วการแปลงมัลติเวฟเล็ดให้ผลการทดสอบดีกว่าการแปลงเวฟเล็ด สำหรับบทนี้จึงได้นำเสนอวิธีการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำ โดยใช้การแปลงมัลติเวฟเล็ด ซึ่งใช้การบีบอัดสัญญาณภาพแบบ SPIHT และการฝังลายน้ำในสัมประสิทธิ์การแปลงที่มีความสำคัญ ในหัวข้อที่ 5.2 ได้กล่าวถึงรายละเอียดของวิธีการที่นำเสนอซึ่งประกอบด้วย ขั้นตอนการเตรียมสัญญาณลายน้ำ ขั้นตอนการฝังลายน้ำในโดเมนการบีบอัดและการคัดแยกลายน้ำ ในหัวข้อที่ 5.3 จะอธิบายถึงกระบวนการในการประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของการฝังลายน้ำ โดยใช้การค้นหา GA และ ATS และในหัวข้อที่ 5.4 เป็นการสรุปของบทนี้

5.2 วิธีการที่นำเสนอ

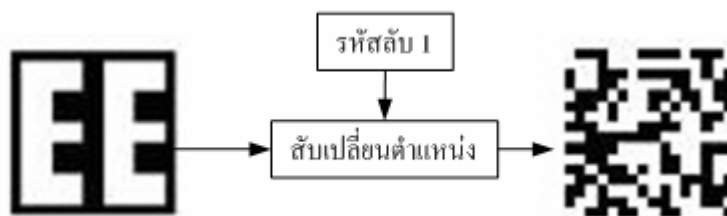
วิธีการที่นำเสนอ เป็นการรวมการบีบอัดสัญญาณภาพกับการฝังลายน้ำเข้าด้วยกัน โดยการบีบอัดสัญญาณภาพใช้การบีบอัดแบบ SPIHT ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็ว การบีบอัดแบบนี้จะให้ความสำคัญกับสัมประสิทธิ์ในทุกแบนด์ย่อย ขั้นตอนของการเข้ารหัสประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลัก คือ การทำ sorting pass และ refinement pass

สำหรับขั้นตอนการทำ sorting pass เป็นขั้นตอนการกำหนดความสำคัญของสัมประสิทธิ์การแปลงและขั้นตอน refinement pass เป็นการส่งค่าบิตของสัมประสิทธิ์ในรอบก่อนหน้าเพื่อเข้ารหัส โดยสัมประสิทธิ์เหล่านี้ได้จากขั้นตอนที่แล้ว ซึ่งจะสังเกตว่าการเข้ารหัสแบบนี้จะดำเนินการกับสัมประสิทธิ์ที่มีความสำคัญเท่านั้น ทำให้การฝังลายน้ำควรจะดำเนินการกับสัมประสิทธิ์เหล่านั้นเช่นกันเพื่อป้องกันไม่ให้สัญญาณลายน้ำหายไป

การฝังลายน้ำในสัมประสิทธิ์ที่มีความสำคัญสามารถทำได้ใน 2 ส่วนคือ ดำเนินการกับสัมประสิทธิ์โดยตรงก่อนทำการเข้ารหัสและการดำเนินการกับบิตหรือสัมประสิทธิ์ในระหว่างการเข้ารหัส ซึ่งมีข้อดี ข้อเสียแตกต่างกัน คือ การฝังลายน้ำในสัมประสิทธิ์ก่อนการเข้ารหัสจะต้องทราบถึงสัมประสิทธิ์ที่มีความสำคัญก่อน ซึ่งถูกกำหนดโดยกระบวนการเข้ารหัสแบบ SPIHT ดังนั้น อาจจะต้องดำเนินการเข้ารหัสมากกว่าหนึ่งครั้ง และจะต้องคำนึงถึงการสูญเสียของสัมประสิทธิ์ที่เกิดจากการเข้ารหัสที่อัตราบิตต่ำด้วย ส่วนการฝังลายน้ำในระหว่างการเข้ารหัสโดยการแก้ไขบิตส่งออกทำให้กระบวนการใช้เวลาในการดำเนินการน้อย แต่ก่อนข้างจะมีความยืดหยุ่นในการฝังลายน้ำน้อยด้วยเช่นกัน ดังนั้นจึงได้นำเสนอวิธีการฝังลายน้ำในสัมประสิทธิ์ก่อนการเข้ารหัสโดยอาศัยการเปลี่ยนระดับของค่าสัมประสิทธิ์เทียบกับค่าขีดเริ่มเปลี่ยน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.2.1 การเตรียมสัญญาณภาพและสัญญาณลายน้ำ

สัญญาณภาพที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นสัญญาณภาพดิจิทัลมีไฟล์นามสกุล RAW ซึ่งเป็นข้อมูลภาพที่ยังไม่ผ่านการบีบอัด โดยข้อมูลเหล่านั้นจะเป็นค่าพิกเซลของภาพ และไม่มีไฟล์ส่วนหัว (header file) ใด ๆ ส่วนสัญญาณลายน้ำจะเป็นภาพขาวดำซึ่งก่อนที่จะนำไปใช้ฝังเข้าไปในภาพต้องมีการสับเปลี่ยนตำแหน่งเพื่อความปลอดภัยในการกู้คืนสัญญาณลายน้ำ แสดงได้ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 การเตรียมสัญญาณลายน้ำ

5.2.2 ขั้นตอนการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำ

กำหนดให้ภาพต้นแบบ I เป็นภาพระดับเทา w เป็นสัญญาณลายน้ำแบบภาพขาวดำและ I_w เป็นภาพหลังการบีบอัดสัญญาณภาพและฝังลายน้ำ ซึ่งมีขั้นตอนการฝังลายน้ำพร้อมกับการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ SPIHT ดังนี้

1) ภาพลายน้ำแบบขาวดำ w ขนาด $M_1 \times N_1$ ถูกสับเปลี่ยนโดยใช้รหัสลับ K จากนั้นจะได้สัญญาณลายน้ำ V ที่เป็นลำดับเวกเตอร์แบบสุ่มซึ่งประกอบด้วย $v_k = \{0,1\}$ โดยที่ $k = 1, 2, 3, \dots, M_1 \times N_1$

2) แปลงสัญญาณภาพต้นแบบ I ด้วยการแยกองค์ประกอบเวฟเลตหรือมัลติเวฟเลตทั้งหมด 5 ระดับ ดังนั้น จะได้แบนด์ย่อยทั้งหมด 16 แบนด์ย่อย ซึ่งจะถูกแทนด้วย LH_l , HL_l และ HH_l โดยที่ $l = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ ในระดับการแปลงสูงสุดจะมีแบนด์ย่อย LL_5 อีกหนึ่งแบนด์ย่อยเรียกว่า แบนด์ย่อยการประมาณค่า (approximation subband) ซึ่งจะไม่ทำการฟังกลายน้ำในแบนด์ย่อยนี้ เนื่องจากจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของภาพเป็นอย่างมาก

3) เลือกสัมประสิทธิ์การแปลงที่มีขนาดอยู่ในช่วง (T_1, T_2) ในแบนด์ย่อย LH_5 , HL_5 , HH_5 , LH_4 , HL_4 , HH_4 , LH_3 , HL_3 และ HH_3 โดยสัมประสิทธิ์การแปลงในแต่ละแบนด์ย่อยจะถูกแสดงโดยค่า $c(u, v)$ เมื่อ u และ v เป็นค่าตำแหน่งของสัมประสิทธิ์ในแบนด์ย่อย

4) เลือกสัมประสิทธิ์ที่ได้จากข้อ 3) โดยเลือกสัมประสิทธิ์ที่มีขนาดใกล้เคียงกับค่า T_w เนื่องจากจะช่วยลดการผิดเพี้ยนของภาพหลังการฟังกลายน้ำ จากนั้นจึงนำสัมประสิทธิ์เหล่านั้นไปทำการฟังกลายน้ำตามสมการที่ (5.1) จนครบตามจำนวนบิตที่ต้องการ

$$c'(u, v) = \begin{cases} \text{sign}(c(u, v)) \times [T_w + \alpha_1 (T_2 - T_w)] & \text{ถ้า } v_k = 1 \\ \text{sign}(c(u, v)) \times [T_w - \alpha_2 (T_w - T_1)] & \text{ถ้า } v_k = 0 \end{cases} \quad (5.1)$$

โดยที่ $c'(u, v)$ คือ สัมประสิทธิ์หลังการฟังกลายน้ำที่พิกัด (u, v)

$c(u, v)$ คือ สัมประสิทธิ์ก่อนการฟังกลายน้ำที่พิกัด (u, v)

T_w คือ ค่าขีดเริ่มเปลี่ยนของการฟังกลายน้ำ

α_1 คือ ค่าความแกร่งของลายน้ำ เมื่อ $v_k = 1$

α_2 คือ ค่าความแกร่งของลายน้ำ เมื่อ $v_k = 0$

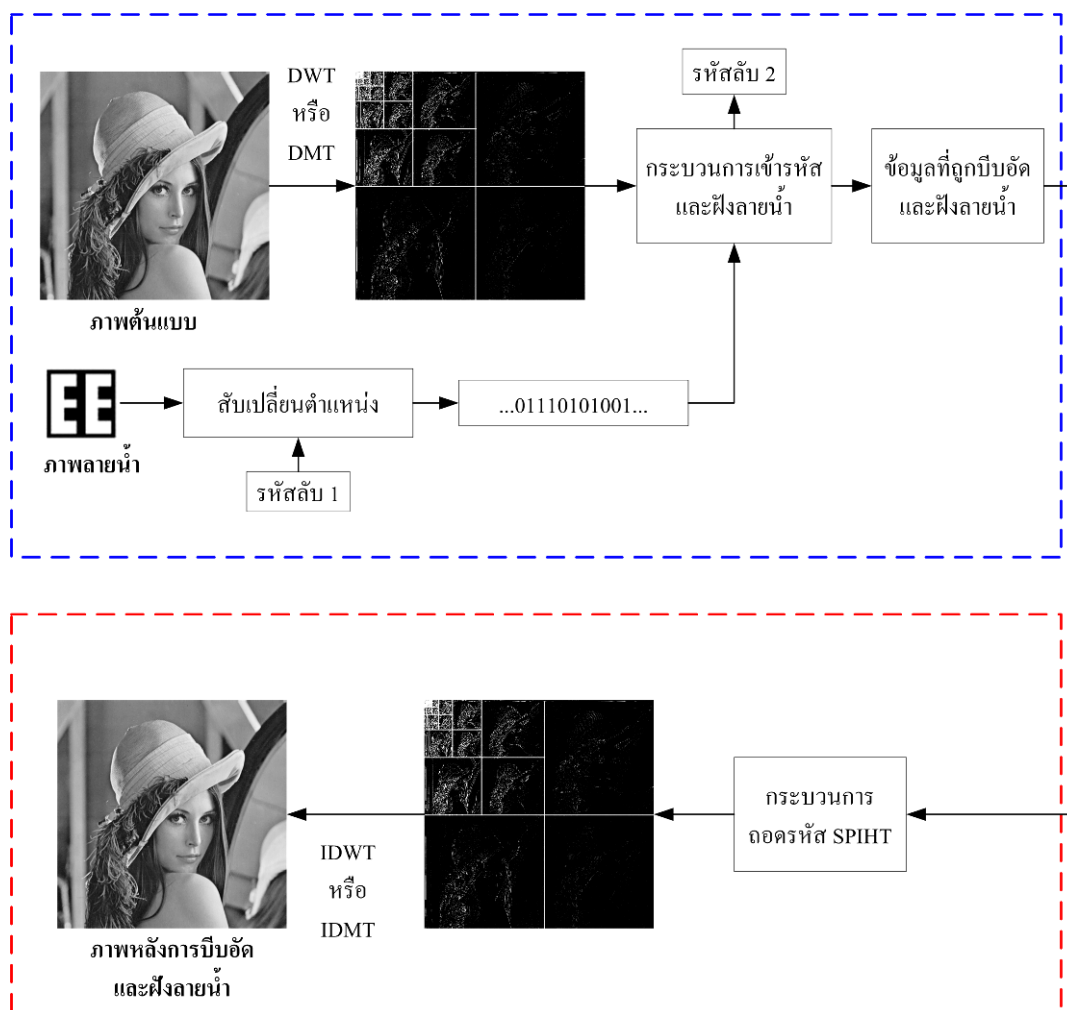
v_k คือ ลายน้ำลำดับเวกเตอร์แบบสุ่มบิตที่ k

สำหรับขอบเขตของค่าพารามิเตอร์ในสมการที่ (5.1) คือ ขอบเขตของ α_1 จะอยู่ในช่วง $[0, 1)$ และขอบเขตของ α_2 อยู่ในช่วง $(0, 1)$

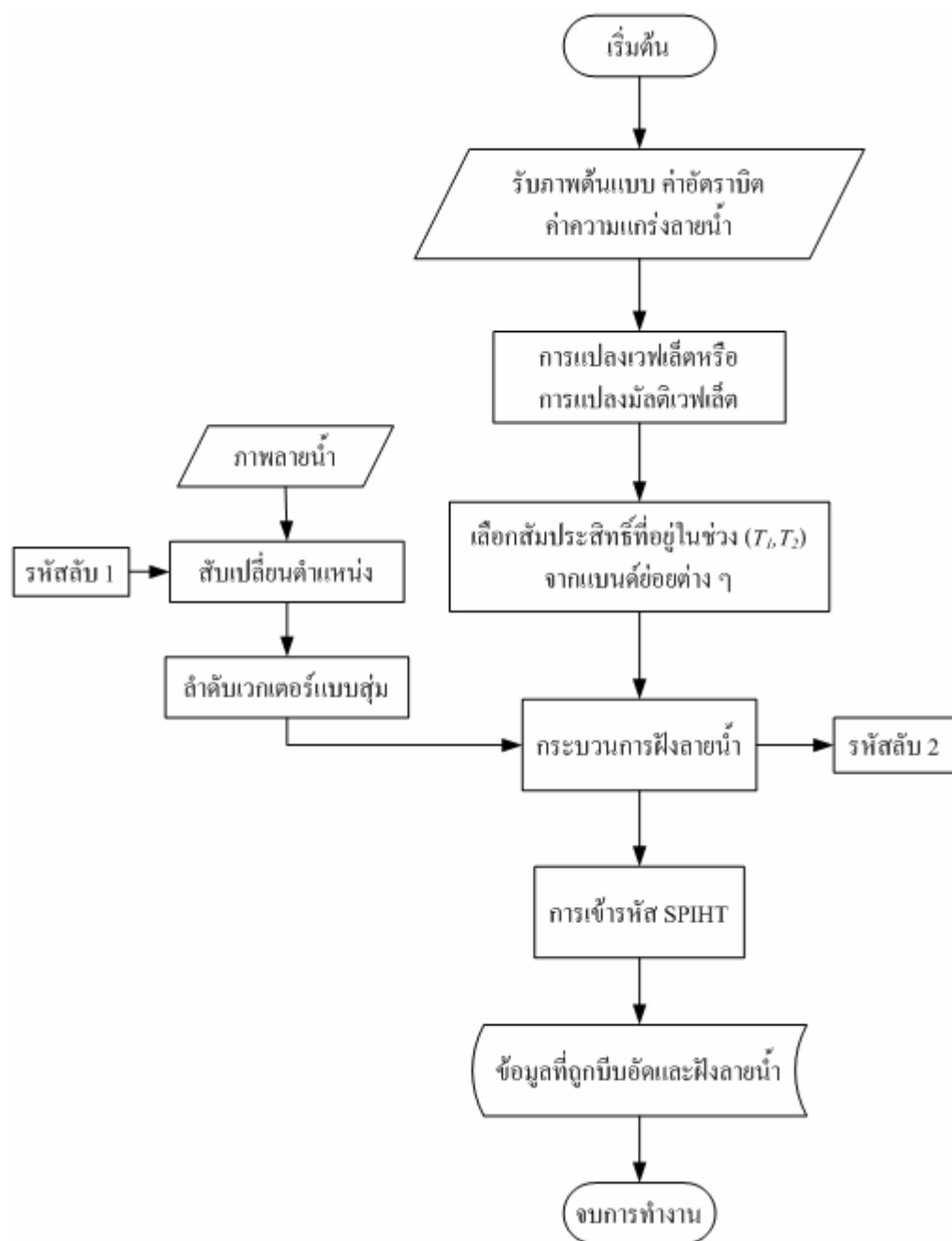
5) ทำการเข้ารหัส SPIHT ด้วยวิธีการปกติทั่วไป โดยใช้สัมประสิทธิ์การแปลงที่ผ่านการฟังกลายน้ำแล้วในข้อ 4) ก็จะได้ข้อมูลที่ถูกบีบอัดและฟังกลายน้ำ

6) สำหรับภาพที่ถูกบีบอัดและฟังกลายน้ำแทนด้วย I_w สามารถสร้างกลับได้โดยการถอดรหัส SPIHT และแปลงกลับสัญญาณภาพ

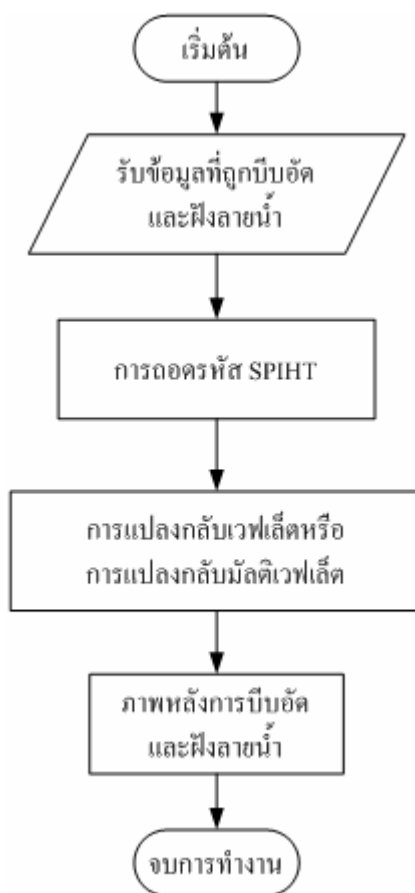
จากอัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณภาพและการฝังลายน้ำที่น่าเสนอ จะประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ การเข้ารหัสพร้อมกับการฝังลายน้ำและกระบวนการสร้างกลับภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำ ซึ่งกระบวนการนี้จะทำให้ข้อมูลมีขนาดลดลงเพื่อใช้ในการจัดเก็บหรือส่งข้อมูลสามารถแสดงแผนภาพขั้นตอนและแผนผังการเข้ารหัสพร้อมฝังลายน้ำได้ดังรูปที่ 5.2 และรูปที่ 5.3 ตามลำดับ นอกจากนี้การสร้างกลับภาพสามารถทำได้ตามแผนผังดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.2 แผนภาพกระบวนการฝังลายน้ำ



รูปที่ 5.3 แผนผังกระบวนการเข้ารหัสและฝังลายน้ำของวิธีการที่นำเสนอ



รูปที่ 5.4 แผนผังกระบวนการสร้างกลับภาพหลังถูกบีบอัดและฟังลายน้ำ

5.2.3 ขั้นตอนการคัดแยกลายน้ำ

กำหนดให้ภาพ I'_w เป็นภาพต้องสงสัยที่ใช้ในการตรวจจับลายน้ำ และ w' เป็นสัญญาณลายน้ำที่ได้จากการคัดแยกของภาพ I'_w กระบวนการคัดแยกลายน้ำของวิธีการที่นำเสนอจะต้องอาศัยรหัสลับ 2 ช่วยในการคัดแยกลายน้ำและใช้รหัสลับ 1 ในการย้อนกลับการสับเปลี่ยนตำแหน่งของภาพลายน้ำ ซึ่งแสดงแผนภาพได้ดังรูปที่ 5.5 และมีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) แปลงสัญญาณภาพต้องสงสัยโดยใช้การแยกองค์ประกอบเวฟเลตหรือมัลติเวฟเลตตามที่ใช้ในขั้นตอนการฟังลายน้ำทั้งหมด 5 ระดับ เพื่อให้ได้สัมประสิทธิ์การแปลง $c'_w(u,v)$

2) ทำการคัดแยกลายน้ำจากสัมประสิทธิ์ที่ถูกฟังในแบนด์ย่อยต่าง ๆ โดยเทียบกับค่าขีดเริ่มเปลี่ยนของการคัดแยกลายน้ำ ดังสมการที่ (5.2)

$$v'_k = \begin{cases} 1 & , \text{ if } |c'_w(u,v)| \geq T'_w \\ 0 & , \text{ otherwise} \end{cases} \quad (5.2)$$

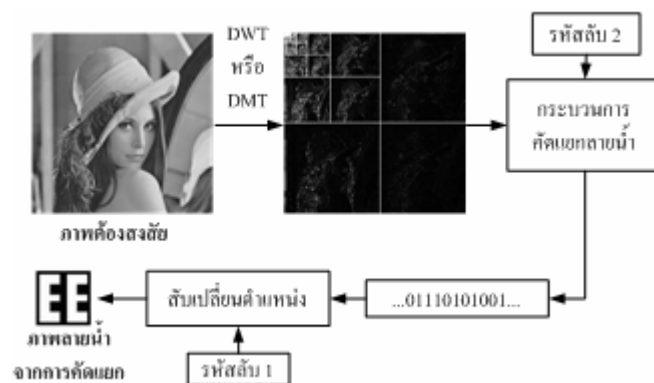
โดยที่ v'_k คือ ลายน้ำที่ได้จากการคัดแยกลำดับบิตที่ k
 $c'_w(u,v)$ คือ สัมประสิทธิ์การแปลงของภาพ I'_w ที่พิกัด (u,v)
 T'_w คือ ค่าขีดเริ่มเปลี่ยนของการคัดแยกลายน้ำ

ทำซ้ำขั้นตอนนี้จนกระทั่งได้สัญญาณลายน้ำครบทุกบิต หรือได้ V' ซึ่งเป็นลำดับเวกเตอร์แบบสุ่มที่ได้จากการคัดแยกนั่นเอง

3) จากนั้นนำสัญญาณลายน้ำที่ได้ไปจัดให้อยู่ในรูปแบบของภาพขาวดำ ขนาด $M_1 \times N_1$ เท่ากับภาพลายน้ำต้นฉบับ โดยการย้อนกลับกระบวนการสับเปลี่ยนตำแหน่ง ซึ่งก็จะได้ภาพ W' จากการคัดแยก

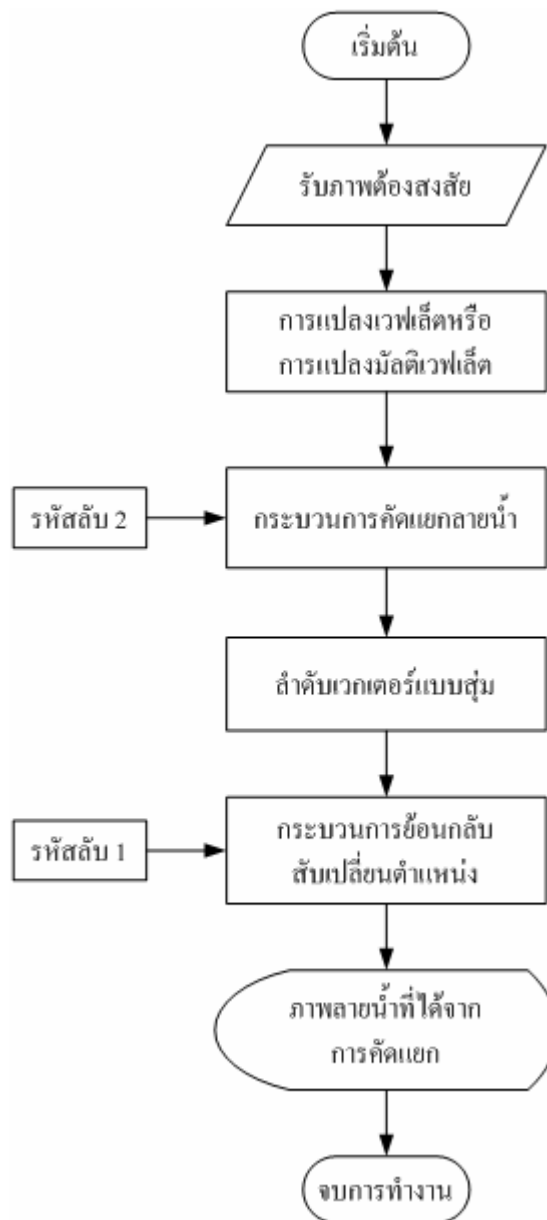
4) หลังจากการคัดแยกลายน้ำแล้วทำการวัดค่าความเหมือนของสัญญาณลายน้ำต้นฉบับกับสัญญาณลายน้ำที่ได้จากการคัดแยก โดยใช้ค่า Normalized Cross-Correlation (NC) ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$NC(W, W') = \frac{\sum_{k=1}^n w_k w'_k}{\sum_{k=1}^n w_k w_k} \quad (5.3)$$



รูปที่ 5.5 แผนภาพกระบวนการคัดแยกลายน้ำ

โดยในการคำนวณค่า NC จะต้องทำการสลับขั้วของสัญญาณลายนํ้าก่อน ถ้า $w_k = 0$ ให้แทนค่าเป็น -1 และ $w_k = 1$ ก็แทนเป็น 1 เหมือนเดิม แผนภาพกระบวนการคิดแยกลายนํ้าและแผนผังอัลกอริทึมการคิดแยกลายนํ้าของวิธีการที่นำเสนอแสดงได้ดังรูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.6 ตามลำดับ

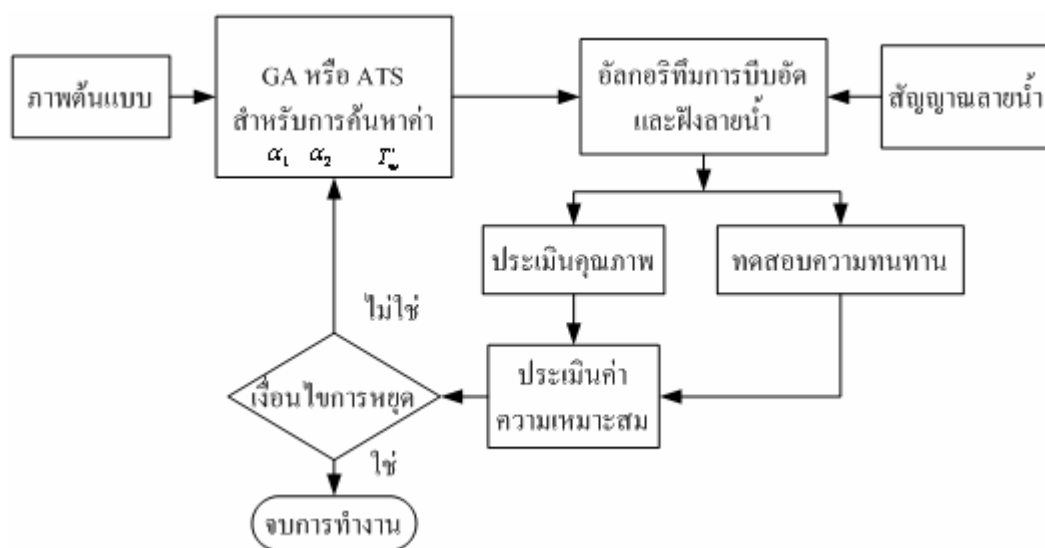


รูปที่ 5.6 แผนผังอัลกอริทึมการคิดแยกลายนํ้า

5.3 การค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการฝังลายน้ำ

เนื่องจากคุณสมบัติหลักที่ต้องการของอัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณภาพและการฝังลายน้ำ คือ ความต้องการด้านคุณภาพของภาพที่จะต้องไม่แตกต่างกับภาพต้นแบบมากนักหรือต้องไม่ทำให้ภาพผิดเพี้ยนไปจากเดิมจนสามารถสังเกตเห็นได้ ความต้องการอีกประการหนึ่ง คือ สัญญาณลายน้ำจะต้องมีความทนทานต่อการถูกโจมตีจากการบีบอัดสัญญาณภาพและการประมวลผลสัญญาณภาพพื้นฐานต่าง ๆ ดังนั้น จะต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์ซึ่งใช้ในกระบวนการฝังลายน้ำให้เหมาะสมเพื่อให้ได้ตามจุดประสงค์ที่ต้องการมากที่สุด จากความต้องการเบื้องต้นทั้งสองจะเห็นว่าเป็นความต้องการที่มีความขัดแย้งกัน กล่าวคือ เมื่อความต้องการหนึ่งมีผลติดตามที่ต้องการแต่ความต้องการอีกอย่างอาจจะไม่ผลไม่เต็มมากนักก็ได้ จึงทำให้เกิดเป็นปัญหาค่าเหมาะสมที่สุด

จากปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดที่เกิดขึ้นทำให้ต้องหาวิธีการแก้ปัญหานี้ ซึ่งเครื่องมือสำคัญที่มีประสิทธิภาพและเป็นที่ยอมรับมากอย่างหนึ่ง คือ การใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ในงานวิจัยนี้ได้นำวิธีการของ GA และ ATS มาประยุกต์ใช้ในการค้นหาพารามิเตอร์ของการฝังลายน้ำ โดยมีขั้นตอนการค้นหาดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 แผนภาพการหาพารามิเตอร์ของการฝังลายน้ำด้วย GA และ ATS

5.3.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

จากความต้องการที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ทำให้ต้องเลือกฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เป็นตัวแทนของความต้องการทั้งสองเพื่อใช้ในการค้นหาค่าความแรงของลายน้ำ (α_1 และ α_2) และค่าขีดเริ่มเปลี่ยนของการคัดแยกลายน้ำ (T'_w) ในส่วนแรกเป็นส่วนของคุณภาพของภาพจะใช้ค่า QI ในการชี้วัดคุณภาพของภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำซึ่งจะทำในโดเมนความถี่และเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อนมากนัก (Sendashonga and Labeau, 2006) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5.4)

$$QI = (w_{LL}MSE_{LL} + w_{HL}MSE_{HL} + w_{LH}MSE_{LH} + w_{HH}MSE_{HH})^{\frac{1}{2}} \quad (5.4)$$

โดยที่ w_{ij} คือ ค่าตัวประกอบการถ่วงน้ำหนัก สามารถคำนวณได้จาก

$$w_{ij} = [q_{ij}(q_{LL}^{-1} + q_{HL}^{-1} + q_{LH}^{-1} + q_{HH}^{-1})]^{-1}$$

เมื่อ $\{ij\} = \{LL, HL, LH, HH\}$ และ $\sum w_{ij} = 1$

ค่าตัวประกอบการถ่วงน้ำหนัก (w_{ij}) สามารถคำนวณได้จากตัวประกอบควอนไทเซชันเวฟเลต (wavelet quantization factor, q_{ij}) แสดงได้ดังตารางที่ 5.1 (Sendashonga and Labeau, 2006)

ตารางที่ 5.1 ค่าตัวประกอบการถ่วงน้ำหนักของการแปลงเวฟเลต

แบนด์ย่อย	q_{ij}	w_{ij}
LL	14.049	0.4066
HL	23.028	0.2481
LH	23.028	0.2481
HH	58.756	0.0972

ในส่วนที่สองเป็นการวัดค่าความทนทานของสัญญาณลายน้ำหลังการถูกโจมตี จะใช้ค่า NC ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.3) โดยที่ขอบเขตของค่านี้จะอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 ถ้าค่าของ NC มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าสามารถคัดแยกลายน้ำได้ทั้งหมดทำให้เหมือนกับลายน้ำต้นฉบับทุกบิตนั่นเอง

สำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ในการประเมินค่าคำตอบของการค้นหา แสดงได้ดังสมการที่ (5.5)

$$f = \delta_{QI} \times QI + \delta_{NC} \times \left(1 - \frac{1}{N_a} \sum_{i=1}^{N_a} NC_i\right) \quad (5.5)$$

โดยที่	f	คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์
	QI	คือ ค่าการประเมินคุณภาพของภาพ
	N_a	คือ จำนวนของการ โจมตีภาพที่ถูกฝังลายน้ำ
	δ_{QI}	คือ ตัวประกอบการถ่วงน้ำหนักของค่า QI
	δ_{NC}	คือ ตัวประกอบการถ่วงน้ำหนักของค่า NC
	NC_i	คือ ค่า normalized correlation ของภาพหลังถูกโจมตีลำดับที่ i

จากสมการที่ (5.5) เป็นสมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์ซึ่งจะมีตัวประกอบการถ่วงน้ำหนักเพื่อให้ความสำคัญกับความต้องการทั้งสอง โดยที่ $\delta_{QI} + \delta_{NC} = 1$ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ให้ความสำคัญเท่ากัน ดังนั้น จึงกำหนดให้ค่า $\delta_{QI} = 0.5$ และ $\delta_{NC} = 0.5$ เช่นกัน และเมื่อพิจารณาค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะเห็นว่า เมื่อคุณภาพของภาพดีเมื่อค่า QI มีค่าเข้าใกล้ศูนย์และสัญญาณลายน้ำมีความทนทานมากเมื่อ $\left(1 - \frac{1}{N_a} \sum_{i=1}^{N_a} NC_i\right)$ มีค่าเป็นศูนย์เช่นกัน ทำให้ปัญหานี้เป็นปัญหาคำต่ำสุด

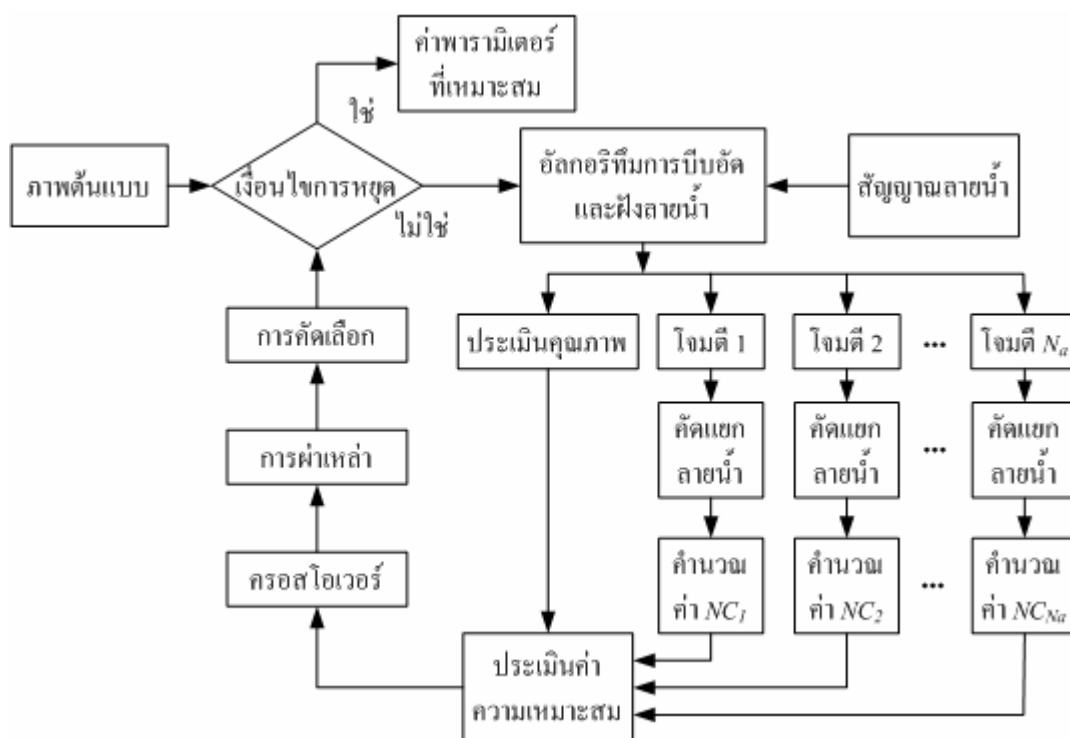
5.3.2 การค้นหาค่าพารามิเตอร์ด้วย GA

ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้ GA เพื่อให้การฝังลายน้ำมีประสิทธิภาพเหมาะสมที่สุด โดยการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ 3 ค่า คือ α_1 , α_2 และ T'_w เพื่อที่จะให้ได้สมดุลจากผลกระทบของตัวประกอบต่าง ๆ รายละเอียดของกระบวนการฝึกสอน GA อธิบายได้ดังนี้

การเข้ารหัสโครโมโซม ในงานวิจัยนี้ใช้โครโมโซมจำนวน 30 โครโมโซม ซึ่งแต่ละโครโมโซมจะใช้รูปแบบการเข้ารหัสเลขฐานสองและใช้แทนพารามิเตอร์ทั้ง 3 ตัวในการค้นหาด้วยความละเอียดเท่ากับ 20 บิตของพารามิเตอร์แต่ละตัว

ฟังก์ชันการประเมินค่า สำหรับการหาค่าเหมาะสมของอัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณภาพและฝังลายน้ำจะทำทั้งในด้านของคุณภาพของภาพและความทนทานของสัญญาณลายน้ำ สำหรับการวัดคุณภาพจะใช้ค่า QI และการวัดความทนทานของสัญญาณลายน้ำใช้ค่า NC ในกระบวนการฝึกสอน GA จะใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตามสมการที่ (5.5)

การคัดเลือก ครอสโอเวอร์และการผ่าเหล่า ในงานวิจัยนี้ใช้การคัดเลือกแบบวงล้อรูเล็ต ความน่าจะเป็นของการทำครอสโอเวอร์และการผ่าเหล่าเท่ากับ 0.7 และ 0.05 ตามลำดับ หลังจากกระบวนการนี้จะได้ประชากรตัวใหม่และทำซ้ำไปจนกว่าจะได้โครโมโซมที่เหมาะสมที่สุด แผนภาพของอัลกอริทึมที่ใช้ GA ในการหาค่าเหมาะสมที่สุดแสดงได้ดังรูปที่ 5.8 และผลการค้นหาค่าพารามิเตอร์อย่างแสดงได้ในภาคผนวก ข.

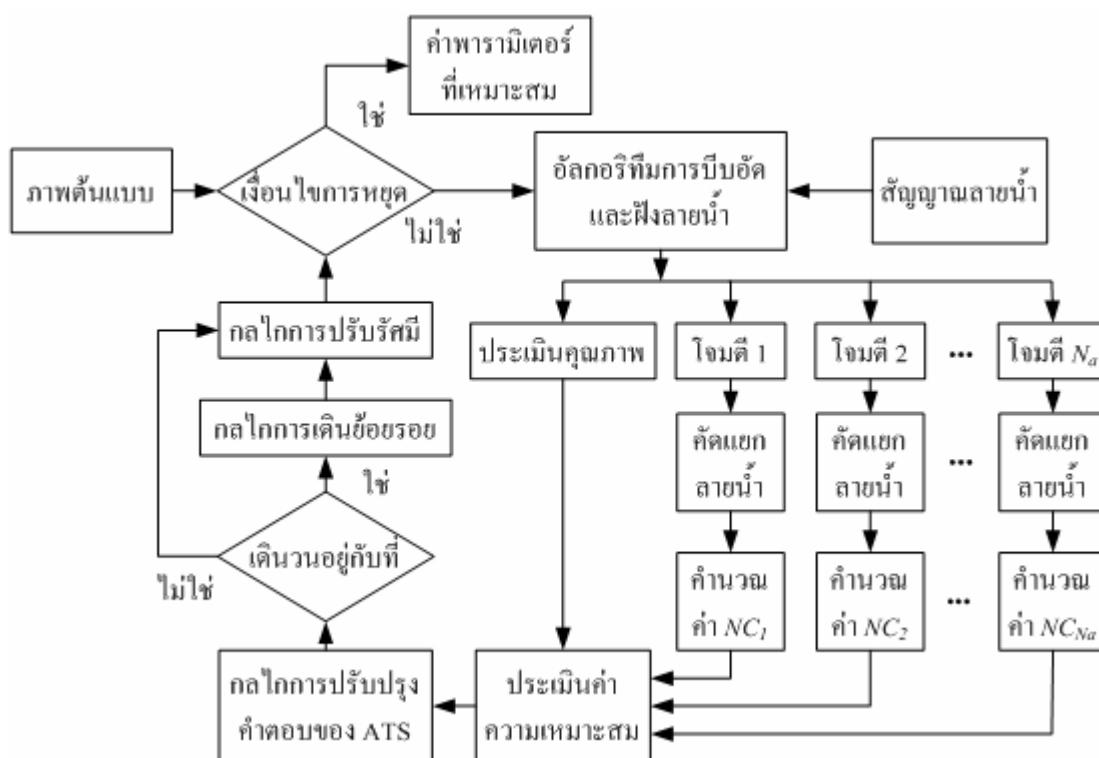


รูปที่ 5.8 แผนภาพการค้นหาค่าพารามิเตอร์ด้วย GA

5.3.3 การค้นหาค่าพารามิเตอร์ด้วย ATS

การค้นหาค่าพารามิเตอร์ด้วย ATS เป็นวิธีที่ได้รับการพัฒนามาจากการค้นหาแบบตาบอดซึ่งมีความรวดเร็วและมีประสิทธิภาพในการค้นหาดีกว่าวิธีการเดิม เบื้องหลังอัลกอริทึมนี้มีลักษณะที่สำคัญ คือ ตาบูลิสต์ ที่ใช้ในการเก็บทางเดินที่ผ่านมาในแต่ละรอบของการค้นหาซึ่งจะนำไปใช้ในกระบวนการเดินย้อนรอยเพื่อให้หลุดพ้นจากกับดักค่าต่ำสุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น นอกจากนี้ยังมีกลไกการปรับรัศมีเพื่อใช้ลดพื้นที่ในการค้นหาในกรณีที่การค้นหาเข้าใกล้คำตอบแบบวงกว้าง

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ใช้สมการที่ (5.5) เพื่อหาค่า α_1, α_2 และ T_w ที่เหมาะสม โดยในการค้นหาคำตอบของ ATS ถ้าค่าความแรงของลายน้ำมีค่ามากเกินไปจะทำให้ลายน้ำมีความทนทานต่อการถูกโจมตี แต่คุณภาพของภาพจะต่ำลง ทำให้ ATS มีการปรับค่าคำตอบเป็นค่าใหม่ แต่ในทางกลับกันค่าความแรงที่น้อยเกินไปลายน้ำก็จะไม่ทนทานต่อการถูกโจมตี กระบวนการของ ATS ก็จะทำซ้ำจนกระทั่งได้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด ถ้าไม่เช่นนั้นแล้ว ATS จะปฏิเสธคำตอบที่ได้และทำการเริ่มค้นหาคำตอบใหม่ โดยก่อนเริ่มรอบการค้นหาใหม่ ATS จะทำการตรวจสอบคำตอบในขณะนั้นกับทฤษฎีที่ว่าดีขึ้นกว่าคำตอบที่ผ่านมาหรือไม่เพื่อเรียกใช้กลไกการเดินย้อนรอย แล้วทำการลดพื้นที่ในการค้นหาคำตอบด้วยกลไกการปรับรัศมี กระบวนการค้นหาคำพารามิเตอร์ด้วย ATS แสดงได้ดังรูปที่ 5.9 และผลการค้นหาคำพารามิเตอร์ของการฝังลายน้ำกับภาพตัวอย่างแสดงได้ในภาคผนวก ข.



รูปที่ 5.9 แผนภาพการค้นหาคำพารามิเตอร์ด้วย ATS

5.4 สรุป

บทนี้ได้นำเสนออัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำโดยใช้การแปลงมัลติเวฟเลต ซึ่งจะได้รับประโยชน์ทั้งในด้านการลดขนาดของข้อมูลภาพและการป้องกันการละเมิดลิขสิทธิ์ การบีบอัดสัญญาณภาพที่ใช้เป็นการบีบอัดแบบ SPIHT ซึ่งจะอาศัยความสัมพันธ์แบบซีโรทรี่และให้ความสำคัญกับสัมประสิทธิ์ในทุกแบนด์ย่อย การเข้ารหัสจะมีกระบวนการที่ใช้ในการกำหนดความสำคัญของสัมประสิทธิ์โดยพิจารณาจากขนาดของสัมประสิทธิ์เทียบกับค่าขีดเริ่มเปลี่ยนในแต่ละรอบ ทำให้เทคนิคการฝังลายน้ำที่นำเสนอต้องทำการฝังลายน้ำเข้าไปในส่วนของสัมประสิทธิ์ที่มีความสำคัญเหล่านั้นด้วย เพื่อป้องกันการสูญหายไปของลายน้ำเนื่องจากกระบวนการเข้ารหัส สำหรับการคัดแยกลายน้ำจะต้องใช้รหัสลับที่ได้จากขั้นตอนการฝังลายน้ำช่วยในการคัดแยกและเพื่อความปลอดภัยด้วย นอกจากนี้ยังได้เสนอวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ในการฝังลายน้ำที่เหมาะสม เพื่อให้ความต้องการเบื้องต้นของการฝังลายน้ำที่ขัดแย้งกันมีความสมดุล นั่นคือในด้านของคุณภาพของภาพและความทนทานของสัญญาณลายน้ำโดยวิธีการทางปัญญาระดับสูงซึ่งประกอบไปด้วยการค้นหาแบบ GA และ ATS

บทที่ 6

ผลการทดสอบ

6.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบประสิทธิภาพของการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฟังกายน้ำที่ได้นำเสนอ โดยพิจารณาออกเป็น 2 ส่วน คือ คุณภาพของภาพหลังฟังกายน้ำและความทนทานของสัญญาณลายน้ำหลังการถูกโจมตีด้วยวิธีการต่าง ๆ โดยใช้พารามิเตอร์ของการฟังกายน้ำที่ได้จากการค้นหาด้วย ATS และ GA ซึ่งสามารถดูได้ในภาคผนวก ข. สำหรับภาพที่ใช้ในการทดสอบมีทั้งหมด 6 ภาพ แสดงได้ดังภาคผนวก ก. การทดสอบหัวข้อที่ 6.2 จะเป็นการทดสอบอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่อัตราการบีบอัดที่แตกต่างกัน ในหัวข้อที่ 6.3 เป็นการเปรียบเทียบผลระหว่างการใช้การแปลงมัลติเวฟเล็ดและการแปลงเวฟเล็ดกับอัลกอริทึมที่นำเสนอ

6.2 ผลการทดสอบของอัลกอริทึมที่นำเสนอ

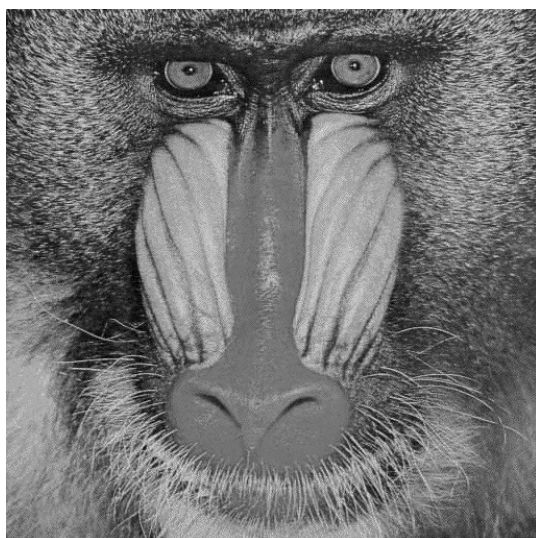
ในหัวข้อนี้ได้วัดประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่นำเสนอกับภาพทดสอบจำนวน 6 ภาพ โดยพิจารณาถึงคุณภาพของภาพหลังการบีบอัดและฟังกายน้ำ ต่อจากนั้นทดสอบความทนทานของสัญญาณลายน้ำโดยการโจมตีด้วยการประมวลผลสัญญาณภาพพื้นฐานและการบีบอัดสัญญาณภาพ สำหรับการบีบอัดสัญญาณภาพจะเข้ารหัส SPIHT ที่อัตราบิตเท่ากับ 0.3 bpp สำหรับภาพทดสอบทุกภาพ การแยกองค์ประกอบสัญญาณภาพใช้ DGHM มัลติเวฟเล็ดทั้งหมด 5 ระดับ โดยกำหนดให้ $T_1 = 64$, $T_2 = 256$ และ $T_w = 128$ สำหรับพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบจะมีด้วยกันทั้งหมด 3 ชุด คือ พารามิเตอร์จากการสุ่มค่า พารามิเตอร์จากการค้นหาด้วย ATS และพารามิเตอร์จากการค้นหาด้วย GA สำหรับพารามิเตอร์จากการสุ่มค่า กำหนดให้ $\alpha_1 = 0.2$, $\alpha_2 = 0.2$ และ $T'_w = 128$

6.2.1 คุณภาพของภาพหลังการบีบอัดและฟังกายน้ำ

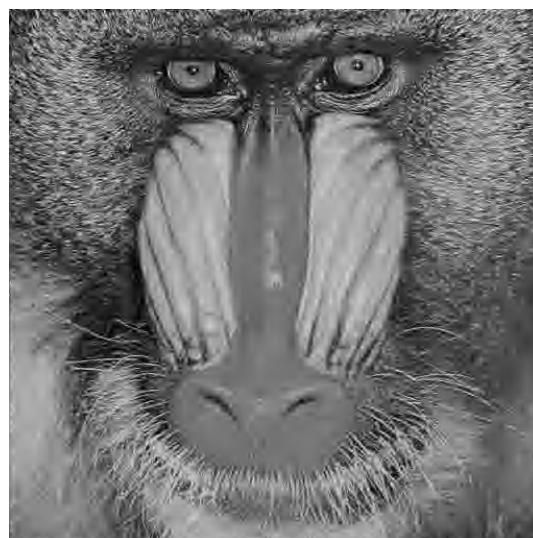
ในการวัดคุณภาพของภาพจะใช้ค่า $PSNR$ และค่า QI ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 6.1 และตารางที่ 6.2 ตามลำดับ โดยวัดคุณภาพของภาพหลังการบีบอัดแต่ไม่ฟังกายน้ำและคุณภาพของภาพหลังการบีบอัดพร้อมกับฟังกายน้ำ ภาพ “Baboon” และ “Peppers” หลังการบีบอัดและฟังกายน้ำด้วยอัลกอริทึมที่นำเสนอแสดงได้ดังรูปที่ 6.1 และรูปที่ 6.2 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าไม่สามารถที่จะสังเกตเห็นความแตกต่างได้

ตารางที่ 6.1 คุณภาพของภาพวัดโดยใช้ค่า $PSNR$ (dB) ที่อัตราบิต 0.3 bpp

ภาพ	SPIHT	SPIHT + การฝังลายน้ำ		
		การสุ่มค่า	ATS	GA
Baboon	22.2367	22.214	22.214	22.214
Barbara	28.0283	27.9725	27.9725	27.9725
Boat	30.5993	30.4925	30.4925	30.4925
Goldhill	30.5365	30.4335	30.4335	30.4335
Lena	33.72	33.59	33.50	33.50
Peppers	33.57	33.43	33.34	33.34



(ก)



(ข)

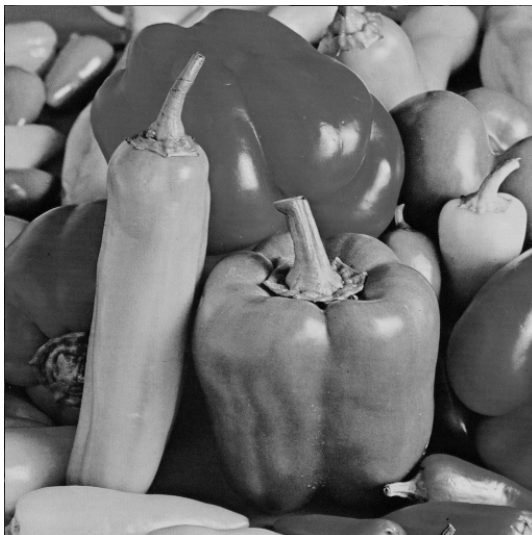
รูปที่ 6.1 (ก) ภาพต้นแบบ (ข) ภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำที่อัตราบิต 0.3 bpp

จากผลการทดสอบพบว่าคุณภาพของภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำของภาพทดสอบแต่ละภาพหลังจากทำการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ SPIHT แต่ไม่ฝังลายน้ำจะมีค่าที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของแต่ละภาพว่ามีส่วนของพื้นหลังหรือลายเส้นมากน้อยเพียงใด แต่เมื่อทำการฝังลายน้ำเข้าไปพร้อมกับการบีบอัดคุณภาพของภาพจะลดลงจากเดิมไม่มากนัก และจากการใช้ค่าพารามิเตอร์ของการฝังลายน้ำจากการค้นหาด้วย ATS และ GA คุณภาพของภาพก็

ยังคงไม่แตกต่างกันมากเช่นกัน นอกจากนี้ยังมีการชี้วัดคุณภาพของภาพด้วยค่า QI โดยถ้าค่า QI มีค่าน้อยแสดงว่าคุณภาพของภาพดี แต่ถ้าค่า QI มากแสดงว่าคุณภาพของภาพไม่ดี ซึ่งจากตารางที่ 6.2 ค่า QI ของภาพที่ผ่านการบีบอัดยังไม่ฝังลายน้ำแตกต่างกับภาพถูกบีบอัดและฝังลายน้ำเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ตารางที่ 6.2 คุณภาพของภาพวัดโดยใช้ค่า QI ที่อัตราบิต 0.3 bpp

ภาพ	SPIHT	SPIHT + การฝังลายน้ำ		
		การสุ่มค่า	ATS	GA
Baboon	9.39868	11.4288	11.4288	11.4288
Barbara	4.09356	5.82457	5.82457	5.82457
Boat	3.16116	4.61892	4.61892	4.61892
Goldhill	6.34510	9.53338	9.53338	9.53338
Lena	2.26142	3.18722	3.23122	3.23122
Peppers	2.62079	3.96826	3.98298	3.98298



(ก)



(ข)

รูปที่ 6.2 (ก) ภาพต้นแบบ (ข) ภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำที่อัตราบิต 0.3 bpp

เมื่อพิจารณาภาพ “Baboon” คุณภาพของภาพจะมีค่าเท่ากันทั้งสามค่า เนื่องจากผลของการเข้ารหัสที่อัตราบิตต่ำทำให้สัมประสิทธิ์ที่ได้มีค่าไม่แตกต่างกัน และสำหรับภาพทดสอบบางภาพจะเห็นว่า คุณภาพของภาพที่ใช้พารามิเตอร์จากการสุ่มให้ผลดีกว่าการใช้พารามิเตอร์จากการค้นหาด้วย ATS และ GA แต่เมื่อพิจารณาถึงความทนทานของสัญญาณลายนับพบว่า ภาพที่ใช้พารามิเตอร์จากการค้นหาด้วย ATS และ GA มีความทนทานดีกว่าพารามิเตอร์จากการสุ่ม

6.2.2 ความทนทานของสัญญาณลายน้ำ

การทดสอบความทนทานของสัญญาณลายนํ้าสามารถทำได้โดยการนำเอาภาพที่ถูกฝังลายนํ้าไปโจมตีด้วยการกรองแบบค่ามัธยฐาน การกรองแบบต่ำผ่าน การเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียนและการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG หรือด้วยการประมวลผลสัญญาณภาพอื่น ๆ จากนั้นนำภาพหลังการถูกโจมตีไปทำการคัดแยกลายนํ้าและคำนวณหาค่า NC หรือค่า BER ของลายนํ้าที่ได้จากการคัดแยกกับลายนํ้าต้นแบบ

การโจมตีสัญญาณลายนํ้าด้วยการกรองแบบค่ามัธยฐานของภาพทดสอบ จะทดสอบด้วยตัวกรองขนาดเท่ากับ 3×3 , 5×5 , 7×7 และ 9×9 สามารถแสดงค่า NC ของภาพหลังการถูกโจมตีได้ดังตารางที่ 6.3 ซึ่งจะเห็นว่า ภาพที่ใช้พารามิเตอร์จากการค้นหาด้วย ATS และ GA ส่วนใหญ่จะมีความทนทานดีกว่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการสุ่มเลือกค่า โดยสัญญาณลายนํ้าของอัลกอริทึมที่นำเสนอมีความทนทานที่ดีที่ขนาดตัวกรองเท่ากับ 3×3 และค่า BER ของภาพทดสอบหลังถูกโจมตีด้วยการกรองแบบค่ามัธยฐานที่ขนาดตัวกรองเท่ากับ 5×5 แสดงได้ดังรูปที่ 6.3 ซึ่งอาจจะมีบางภาพที่มีความทนทานของสัญญาณลายนํ้าจากการใช้พารามิเตอร์จากการสุ่มดีกว่าการใช้พารามิเตอร์จาก ATS และ GA แต่เมื่อพิจารณาถึงคุณภาพของภาพและความทนทานจากการโจมตีทั้งหมดจะพบว่าพารามิเตอร์จากการค้นหาด้วย ATS และ GA จะให้ผลดีกว่าพารามิเตอร์จากการสุ่ม

การโจมตีสัญญาณลายนํ้าด้วยการกรองแบบต่ำผ่าน ซึ่งการกรองแบบนี้นิยมนำไปใช้สำหรับการลดสัญญาณรบกวนบางชนิดและช่วยในการปรับปรุงคุณภาพของภาพ ในการทดสอบจะใช้ขนาดของตัวกรองเช่นเดียวกับการกรองแบบค่ามัธยฐาน โดยค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายนํ้าหลังการถูกโจมตีแสดงได้ดังตารางที่ 6.4 ซึ่งจะเห็นว่า สัญญาณลายนํ้ามีความทนทานต่อการถูกโจมตีด้วยการกรองแบบต่ำผ่านที่ขนาดตัวกรองเท่ากับ 3×3 ได้เป็นอย่างดี และค่า BER ของลายนํ้าที่ได้จากการคัดแยกของภาพทดสอบต่าง ๆ หลังการถูกโจมตีด้วยการกรองแบบต่ำผ่านที่ขนาดตัวกรองเท่ากับ 5×5 โดยใช้พารามิเตอร์ที่แตกต่างกันแสดงได้ดังรูปที่ 6.4

ลำดับต่อมาเป็นการ โจมตีสัญญาณลายน้ำด้วยการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน ซึ่งจะมีลักษณะเป็นสัญญาณแบบสุ่ม โดยในการทดสอบจะทำการแปรค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนจาก 100 ถึง 500 ทำให้ได้ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำหลังการถูกโจมตีแสดงได้ดังตารางที่ 6.5 ซึ่งลายน้ำที่ได้มีความทนทานน้อยกว่าลายน้ำที่ถูกโจมตีด้วยการกรองทั้งสองชนิดข้างต้น รูปที่ 6.5 แสดงการเปรียบเทียบค่า BER ของภาพหลังการถูกโจมตีด้วยการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียนที่ค่าความแปรปรวนเท่ากับ 100

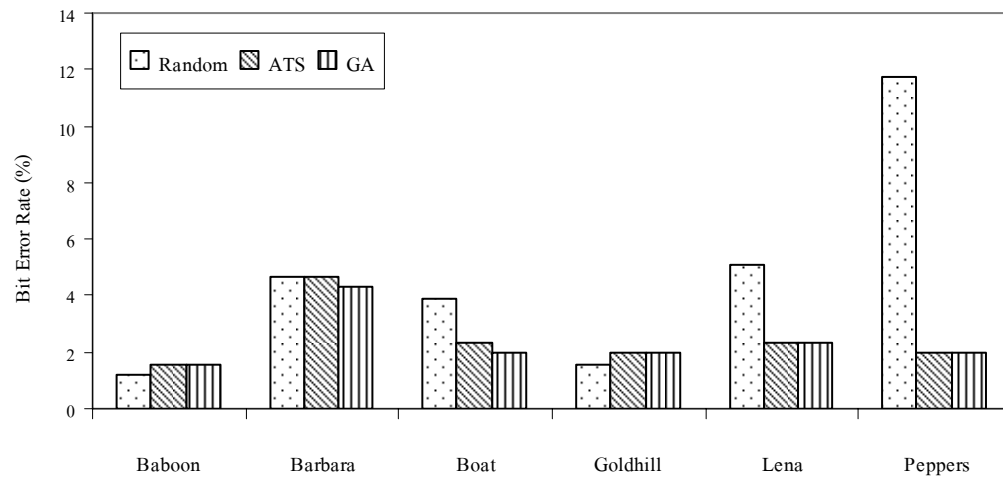
ตารางที่ 6.3 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำที่อัตราบิต 0.3 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการกรองแบบค่ามัธยฐาน

ภาพ	พารามิเตอร์ของการฝังลายน้ำ	ขนาดของตัวกรอง			
		3×3	5×5	7×7	9×9
Baboon	การสุ่มค่า	0.976563	0.976563	0.851563	0.671875
	ATS	0.984375	0.96875	0.859375	0.703125
	GA	0.984375	0.96875	0.859375	0.703125
Barbara	การสุ่มค่า	0.976563	0.90625	0.734375	0.648438
	ATS	0.984375	0.90625	0.78125	0.640625
	GA	0.976563	0.914063	0.796875	0.664063
Boat	การสุ่มค่า	0.992188	0.921875	0.632813	0.414063
	ATS	1	0.953125	0.679688	0.46875
	GA	1	0.960938	0.703125	0.484375
Goldhill	การสุ่มค่า	0.953125	0.96875	0.789063	0.570313
	ATS	0.953125	0.960938	0.757813	0.554688
	GA	0.953125	0.960938	0.757813	0.5625
Lena	การสุ่มค่า	1	0.898438	0.609375	0.484375
	ATS	1	0.953125	0.90625	0.773438
	GA	1	0.953125	0.890625	0.765625
Peppers	การสุ่มค่า	0.992188	0.765625	0.546875	0.359375
	ATS	1	0.960938	0.734375	0.648438
	GA	1	0.960938	0.734375	0.648438

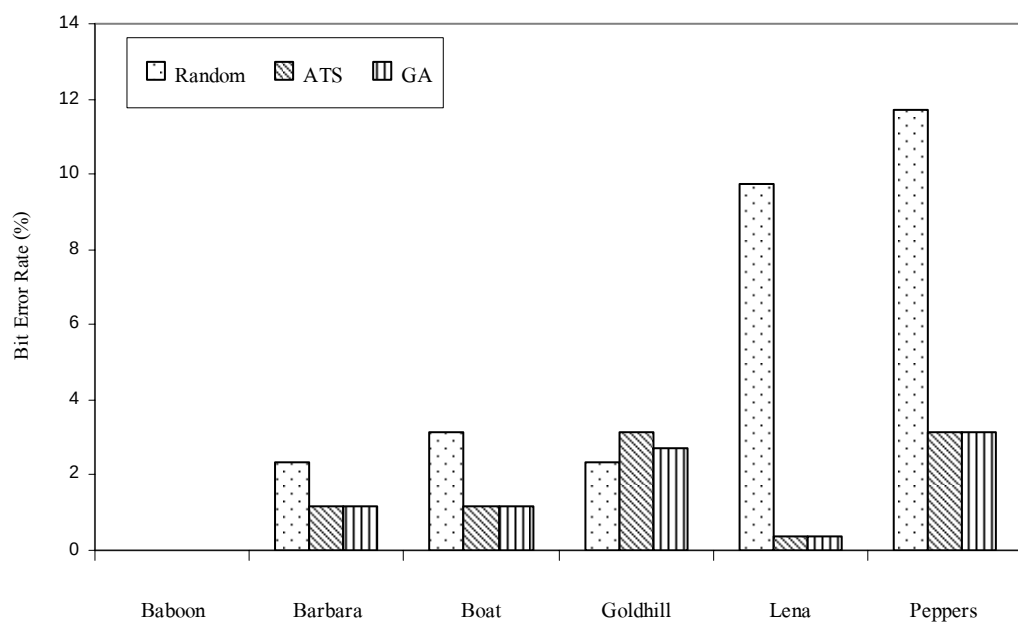
การบีบอัดสัญญาณภาพมาตรฐานแบบ JPEG เป็นการบีบอัดสัญญาณภาพที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ทำให้ต้องมีการทดสอบภาพที่ถูกฝังลายน้ำด้วยการบีบอัดสัญญาณภาพชนิดนี้ โดยจะแปรค่า JPEG quality factor (Q.F.) จาก 10% จนถึง 100% ค่า NC ของลายน้ำที่คัดแยกได้หลังการถูกโจมตีแสดงได้ดังตารางที่ 6.6 จะเห็นว่าสัญญาณลายน้ำสามารถคัดแยกได้ทุกบิตหรือมีค่า NC เท่ากับ 1 ที่ค่า Q.F. เท่ากับ 50 สำหรับภาพทดสอบทุกภาพ และที่ค่า Q.F. ต่ำ ๆ สัญญาณลายน้ำยังคงรอดพ้นจากการโจมตีได้ดีเช่นกัน รูปที่ 6.6 แสดงการเปรียบเทียบค่า BER ของภาพทดสอบหลังถูกโจมตีด้วยการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG ที่ค่า Q.F. เท่ากับ 10%

ตารางที่ 6.4 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำที่อัตราบิต 0.3 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการกรองแบบต่ำผ่าน

ภาพ	พารามิเตอร์ของการฝังลายน้ำ	ขนาดของตัวกรอง			
		3×3	5×5	7×7	9×9
Baboon	การสุ่มค่า	1	1	0.851563	0.695313
	ATS	1	1	0.804688	0.671875
	GA	1	1	0.8125	0.679688
Barbara	การสุ่มค่า	1	0.953125	0.835938	0.640625
	ATS	1	0.976563	0.851563	0.695313
	GA	1	0.976563	0.851563	0.710938
Boat	การสุ่มค่า	1	0.9375	0.789063	0.59375
	ATS	1	0.976563	0.859375	0.6875
	GA	1	0.976563	0.859375	0.71875
Goldhill	การสุ่มค่า	0.984375	0.953125	0.789063	0.617188
	ATS	0.984375	0.9375	0.75	0.546875
	GA	0.984375	0.945313	0.757813	0.554688
Lena	การสุ่มค่า	0.992188	0.804688	0.507813	0.320313
	ATS	1	0.992188	0.867188	0.703125
	GA	1	0.992188	0.882813	0.710938
Peppers	การสุ่มค่า	0.984375	0.765625	0.484375	0.320313
	ATS	1	0.9375	0.726563	0.5625
	GA	1	0.9375	0.726563	0.5625



รูปที่ 6.3 ค่า *BER* ของภาพทดสอบหลังการโจมตีด้วยการกรอแบบค่ามัธยฐาน
ที่ขนาดตัวกรอเท่ากับ 5×5



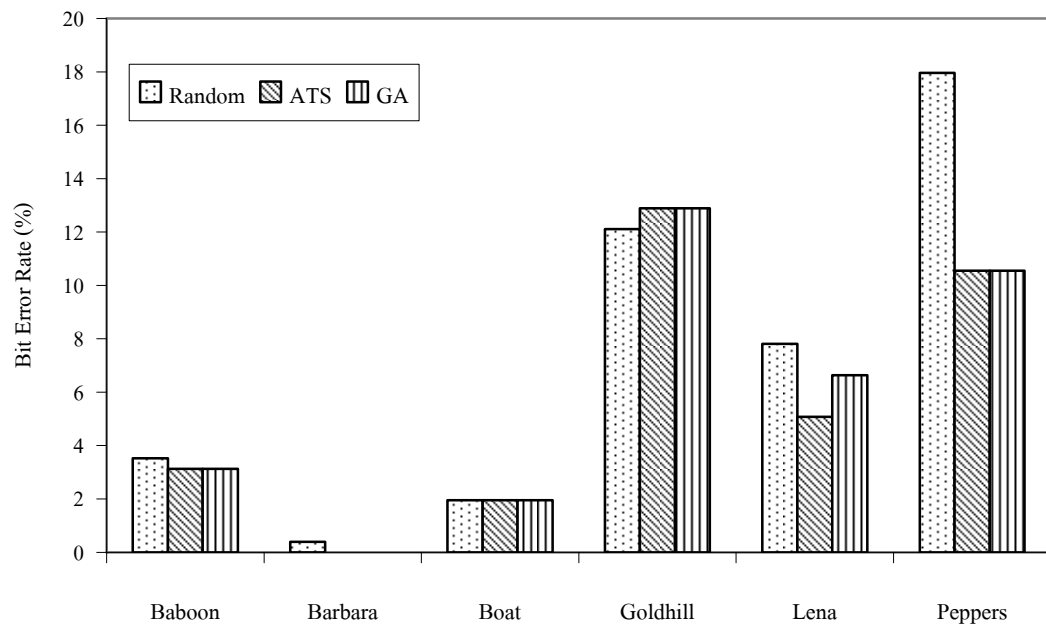
รูปที่ 6.4 ค่า *BER* ของภาพทดสอบหลังการโจมตีด้วยการกรอแบบต่ำผ่าน
ที่ขนาดตัวกรอเท่ากับ 5×5

ตารางที่ 6.5 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำที่อัตราบิต 0.3 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน

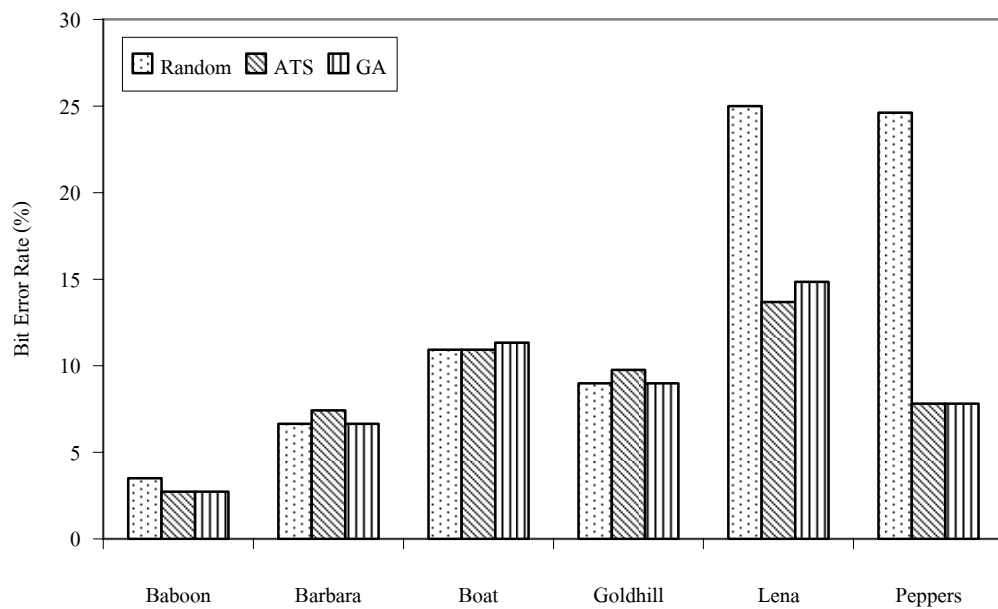
ภาพ	พารามิเตอร์ ของการฝัง ลายน้ำ	ค่าความแปรปรวน				
		100	200	300	400	500
Baboon	การสุ่มค่า	0.929688	0.914063	0.859375	0.820313	0.78125
	ATS	0.9375	0.914063	0.875	0.828125	0.820313
	GA	0.9375	0.90625	0.875	0.828125	0.804688
Barbara	การสุ่มค่า	0.992188	0.929688	0.851563	0.726563	0.625
	ATS	1	0.914063	0.859375	0.75	0.648438
	GA	1	0.90625	0.859375	0.765625	0.640625
Boat	การสุ่มค่า	0.960938	0.898438	0.820313	0.796875	0.734375
	ATS	0.960938	0.898438	0.804688	0.75	0.734375
	GA	0.960938	0.890625	0.796875	0.742188	0.71875
Goldhill	การสุ่มค่า	0.757813	0.671875	0.523438	0.484375	0.421875
	ATS	0.742188	0.617188	0.523438	0.453125	0.429688
	GA	0.742188	0.625	0.53125	0.445313	0.429688
Lena	การสุ่มค่า	0.84375	0.585938	0.53125	0.40625	0.265625
	ATS	0.898438	0.804688	0.679688	0.609375	0.617188
	GA	0.867188	0.789063	0.671875	0.59375	0.609375
Peppers	การสุ่มค่า	0.640625	0.492188	0.382813	0.296875	0.265625
	ATS	0.789063	0.671875	0.554688	0.570313	0.53125
	GA	0.789063	0.671875	0.554688	0.570313	0.53125

ตารางที่ 6.6 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำที่อัตราบิต 0.3 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการบีบอัด
สัญญาณภาพแบบ JPEG

ภาพ	พารามิเตอร์ ของการฝัง ลายน้ำ	Q. F. (%)				
		10	20	30	40	50
Baboon	การสุ่มค่า	0.929688	1	1	1	1
	ATS	0.945313	1	1	1	1
	GA	0.945313	1	1	1	1
Barbara	การสุ่มค่า	0.867188	1	1	1	1
	ATS	0.851563	1	1	1	1
	GA	0.867188	1	1	1	1
Boat	การสุ่มค่า	0.78125	1	1	1	1
	ATS	0.78125	1	1	1	1
	GA	0.773438	1	1	1	1
Goldhill	การสุ่มค่า	0.820313	1	1	1	1
	ATS	0.804688	1	1	1	1
	GA	0.820313	1	1	1	1
Lena	การสุ่มค่า	0.5	0.867188	0.984375	0.984375	1
	ATS	0.726563	0.929688	0.984375	0.992188	1
	GA	0.703125	0.914063	0.96875	0.984375	1
Peppers	การสุ่มค่า	0.507813	0.773438	0.992188	1	1
	ATS	0.84375	0.992188	1	1	1
	GA	0.84375	0.992188	1	1	1



รูปที่ 6.5 ค่า BER ของภาพทดสอบหลังการโจมตีด้วยการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน
ที่ค่าความแปรปรวนเท่ากับ 100



รูปที่ 6.6 ค่า BER ของภาพทดสอบหลังการโจมตีด้วยการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG (Q.F. = 10)

จากผลการทดสอบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์โดยใช้พารามิเตอร์ผู้ม การค้นหาด้วย ATS และ GA พบว่าคุณภาพของภาพลดลงไม่มากนักของพารามิเตอร์ทั้งสามชุด และความทนทานของสัญญาณลายน้ำหลังถูกโจมตีแบบต่าง ๆ ดังตารางที่ 6.3 ถึง ตารางที่ 6.6 สัญญาณลายน้ำที่ได้มีความทนทานต่อการกรองแบบค่ามัธยฐาน การกรองแบบต่ำผ่าน การเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียนและการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG ซึ่งการโจมตีที่ทำให้ลายน้ำเสียหายค่อนข้างมาก คือ การเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบบีบอัดสัญญาณภาพที่อัตราบิตสูง โดยทำการเข้ารหัสที่อัตราบิตเท่ากับ 1.0 bpp ซึ่งสามารถดูได้จากภาคผนวก ก.

6.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างอัลกอริทึมที่ใช้การแปลงมัลติเวฟเลตและการแปลงเวฟเลต

การเปรียบเทียบผลการทดสอบจะใช้การแปลงมัลติเวฟเลตและการแปลงเวฟเลตโดยใช้ อัลกอริทึมที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่นำเสนอ เริ่มจากการนำภาพทดสอบไปแยกองค์ประกอบ สำหรับการแยกองค์ประกอบมัลติเวฟเลตใช้ DGHM มัลติเวฟเลตและการแยกองค์ประกอบเวฟเลต ใช้ Daubechies-4 จากนั้นทำการเข้ารหัส SPIHT ที่อัตราบิตเท่ากับ 0.5 bpp และ 0.8 bpp สำหรับภาพทดสอบทุกภาพ ในที่นี้ไม่ใช้การเข้ารหัสเลขคณิต ในขั้นตอนการฝังลายน้ำจะใช้พารามิเตอร์ของการฝังลายน้ำที่ได้จากการค้นหาด้วย ATS ตามภาคผนวก ข. โดยกำหนดให้ $T_1 = 64$, $T_2 = 256$ และ $T_w = 128$ เมื่อได้ภาพที่ถูกบีบอัดและฝังลายน้ำแล้วจะนำไปประเมินประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่ใช้การแปลงทั้งสองชนิดในด้านของคุณภาพของภาพและความทนทานของสัญญาณลายน้ำหลังการถูกโจมตีด้วยการประมวลผลภาพและการบีบอัดสัญญาณภาพ

6.3.1 เปรียบเทียบผลการทดสอบของภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำที่อัตราบิต 0.5 bpp

ลายน้ำที่ฝังเข้าไปในภาพจะต้องไม่ทำให้ภาพหลังการฝังลายน้ำมีความผิดเพี้ยนไปจากภาพต้นแบบมากนัก ซึ่งสามารถวัดได้โดยการใช้ค่า $PSNR$ และค่า QI ซึ่งผลของการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ SPIHT พร้อมกับการฝังลายน้ำแสดงได้ดังตารางที่ 6.7 และตารางที่ 6.8 ตามลำดับ โดยจะทำการวัดค่าหลังจากการเข้ารหัส SPIHT แต่ยังไม่ฝังลายน้ำและเมื่อเข้ารหัส SPIHT พร้อมกับการฝังลายน้ำ ซึ่งจะทำให้เห็นการลดลงของคุณภาพของภาพเนื่องจากการฝังลายน้ำ ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่า คุณภาพของภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำของอัลกอริทึมที่ใช้การแปลงมัลติเวฟเลตมีคุณภาพของภาพดีกว่าการใช้การแปลงเวฟเลตในทุกภาพทดสอบ ไม่ว่าจะวัดด้วยค่า $PSNR$ หรือค่า QI โดยรูปที่ 6.7 และรูปที่ 6.9 เป็นตัวอย่างภาพ “Barbara” และภาพ “Lena” หลังการบีบอัดพร้อมกับฝังลายน้ำโดยใช้พารามิเตอร์จาก ATS ตามลำดับ ซึ่งใช้การแปลงสัญญาณภาพที่

แตกต่างกันแต่อาจจะไม่สามารถสังเกตเห็นข้อแตกต่างได้ จึงอาจพิจารณาจากขนาดของผลต่างของภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำกับภาพต้นแบบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.8 และรูปที่ 6.10 เป็นภาพขนาดของผลต่างที่ปรับคูณด้วย 6 สำหรับภาพ “Barbara” และปรับคูณด้วย 11 สำหรับภาพ “Lena” ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าภาพที่ใช้การแปลงเวฟเลตจะสามารถสังเกตเห็นส่วนของผลต่างกับภาพต้นแบบได้มากกว่าภาพที่ใช้การแปลงมัลติเวฟเลต

ตารางที่ 6.7 คุณภาพของภาพวัดโดยใช้ค่า $PSNR$ (dB) ที่อัตราบิต 0.5 bpp

ภาพ	วิธีการที่ใช้ทดสอบ			
	Proposed+DMT		Proposed+DWT	
	ไม่ฝังลายน้ำ	ฝังลายน้ำ	ไม่ฝังลายน้ำ	ฝังลายน้ำ
Baboon	23.676	23.65	23.515	23.4948
Barbara	31.0573	30.83	30.1706	29.9755
Boat	33.4698	33.18	32.8995	32.692
Goldhill	33.0194	32.90	32.5467	32.2992
Lena	36.5487	36.1403	35.8433	35.4394
Peppers	35.5919	35.1793	35.3982	35.1284

ตารางที่ 6.8 คุณภาพของภาพวัดโดยใช้ค่า QI ที่อัตราบิต 0.5 bpp

ภาพ	วิธีการที่ใช้ทดสอบ			
	Proposed+DMT		Proposed+DWT	
	ไม่ฝังลายน้ำ	ฝังลายน้ำ	ไม่ฝังลายน้ำ	ฝังลายน้ำ
Baboon	9.39868	9.39799	9.46243	9.50716
Barbara	4.09356	4.2348	4.33305	4.47441
Boat	3.16116	3.29867	3.32188	3.42916
Goldhill	6.3451	6.62530	6.15021	6.25611
Lena	2.26142	2.39894	2.43865	2.58615
Peppers	2.62079	2.83073	2.88682	3.00614



(ก)



(ข)

รูปที่ 6.7 ภาพ “Barbara” หลังการบีบอัดและฝังลายน้ำจากการค้นหาด้วย ATS ที่อัตราบิต 0.5 bpp โดยใช้ (ก) DMT (ข) DWT



(ก)



(ข)

รูปที่ 6.8 ขนาดผลต่างของภาพต้นแบบกับภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำของภาพ “Barbara” ที่อัตราบิต 0.5 bpp ปรับคูณด้วย 6 โดยใช้ (ก) DMT (ข) DWT



(ก)

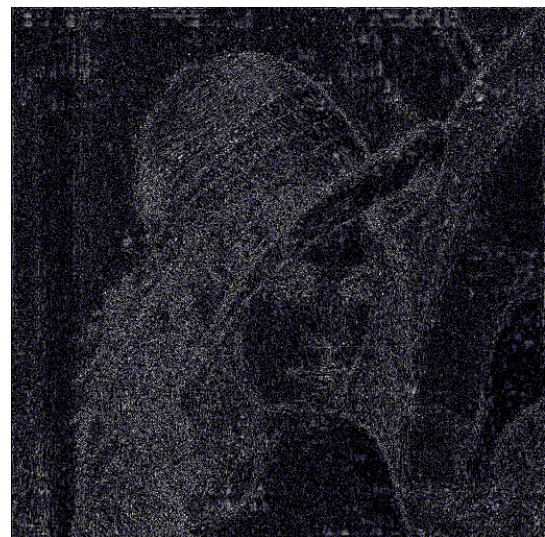


(ข)

รูปที่ 6.9 ภาพ “Lena” หลังการบีบอัดและฝังลายน้ำจากการค้นหาด้วย ATS ที่อัตราบิต 0.5 bpp
โดยใช้ (ก) DMT (ข) DWT



(ก)



(ข)

รูปที่ 6.10 ขนาดผลต่างของภาพต้นแบบกับภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำของภาพ “Lena”
ที่อัตราบิต 0.5 bpp ปรับคูณด้วย 11 โดยใช้ (ก) DMT (ข) DWT

ผลการเปรียบเทียบความทนทานของสัญญาณลายน้ำระหว่างอัลกอริทึมในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ใช้การแปลงมัลติเวฟเล็ดและการแปลงเวฟเล็ดโดยใช้พารามิเตอร์จากการค้นหาด้วย ATS ที่อัตราบิตเท่ากับ 0.5 bpp ซึ่งวัดจากค่า *NC* ดังแสดงในตารางที่ 6.9 และตารางที่ 6.10 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบของภาพหลังถูกโจมตีด้วยการกรองแบบค่ามัธยฐาน ตารางที่ 6.11 และตารางที่ 6.12 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบของภาพหลังถูกโจมตีด้วยการกรองแบบค่าผ่าน ตารางที่ 6.13 และตารางที่ 6.14 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบของภาพหลังถูกโจมตีด้วยการเพิ่มสัญญาณแบบเกาส์เซียน ตารางที่ 6.15 และตารางที่ 6.16 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบของภาพหลังถูกโจมตีด้วยการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG

ตารางที่ 6.9 ค่า *NC* ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DMT ที่อัตราบิต 0.5 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการกรองแบบค่ามัธยฐาน

ภาพ	ขนาดของตัวกรอง			
	3×3	5×5	7×7	9×9
Baboon	0.945313	0.835938	0.539063	0.328125
Barbara	1	0.96875	0.875	0.804688
Boat	1	0.835938	0.617188	0.414063
Goldhill	0.984375	0.726563	0.445313	0.28125
Lena	1	0.984375	0.90625	0.742188
Peppers	1	0.921875	0.6875	0.601563

ตารางที่ 6.10 ค่า *NC* ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DWT ที่อัตราบิต 0.5 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการกรองแบบค่ามัธยฐาน

ภาพ	ขนาดของตัวกรอง			
	3×3	5×5	7×7	9×9
Baboon	0.96875	0.828125	0.640625	0.539063
Barbara	0.984375	0.945313	0.890625	0.796875
Boat	0.992188	0.84375	0.640625	0.390625
Goldhill	1	0.953125	0.75	0.554688
Lena	1	0.960938	0.867188	0.765625
Peppers	0.984375	0.8125	0.648438	0.492188

ตารางที่ 6.11 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DMT ที่อัตราบิต 0.5 bpp หลังการถูกโจมตีด้วย
การกรองแบบต่ำผ่าน

ภาพ	ขนาดของตัวกรอง			
	3×3	5×5	7×7	9×9
Baboon	1	0.851563	0.65625	0.445313
Barbara	1	1	0.90625	0.796875
Boat	1	0.953125	0.78125	0.617188
Goldhill	0.992188	0.773438	0.507813	0.320313
Lena	1	0.960938	0.8125	0.578125
Peppers	1	0.921875	0.710938	0.546875

ตารางที่ 6.12 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DWT ที่อัตราบิต 0.5 bpp หลังการถูกโจมตีด้วย
การกรองแบบต่ำผ่าน

ภาพ	ขนาดของตัวกรอง			
	3×3	5×5	7×7	9×9
Baboon	1	0.914063	0.765625	0.601563
Barbara	1	1	0.96875	0.851563
Boat	1	0.960938	0.773438	0.59375
Goldhill	1	0.984375	0.890625	0.625
Lena	1	0.992188	0.90625	0.75
Peppers	1	0.695313	0.492188	0.34375

ตารางที่ 6.13 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DMT ที่อัตราบิต 0.5 bpp หลังการถูกโจมตีด้วย
การเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน

ภาพ	ค่าความแปรปรวน				
	100	200	300	400	500
Baboon	0.921875	0.84375	0.796875	0.71875	0.726563
Barbara	1	1	0.953125	0.929688	0.859375
Boat	0.953125	0.921875	0.859375	0.78125	0.765625
Goldhill	0.679688	0.515625	0.40625	0.328125	0.328125
Lena	0.984375	0.921875	0.796875	0.71875	0.617188
Peppers	0.789063	0.6875	0.59375	0.5625	0.546875

ตารางที่ 6.14 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DWT ที่อัตราบิต 0.5 bpp หลังการถูกโจมตีด้วย
การเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน

ภาพ	ค่าความแปรปรวน				
	100	200	300	400	500
Baboon	0.914063	0.828125	0.804688	0.726563	0.703125
Barbara	0.992188	0.976563	0.9375	0.875	0.828125
Boat	0.960938	0.875	0.804688	0.710938	0.695313
Goldhill	0.773438	0.65625	0.523438	0.515625	0.476563
Lena	1	0.914063	0.867188	0.796875	0.726563
Peppers	0.664063	0.523438	0.515625	0.46875	0.421875

ตารางที่ 6.15 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DMT ที่อัตราบิต 0.5 bpp หลังการถูกโจมตีด้วย
การบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG

ภาพ	Q.F.(%)				
	10	20	30	40	50
Baboon	0.828125	0.984375	1	1	1
Barbara	0.984375	1	1	1	1
Boat	0.804688	0.984375	1	1	1
Goldhill	0.515625	0.867188	0.929688	1	1
Lena	0.828125	1	1	1	1
Peppers	0.828125	0.992188	1	1	1

ตารางที่ 6.16 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DWT ที่อัตราบิต 0.5 bpp หลังการถูกโจมตีด้วย
การบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG

ภาพ	Q.F.(%)				
	10	20	30	40	50
Baboon	0.875	0.992188	1	1	1
Barbara	0.929688	1	1	1	1
Boat	0.710938	0.96875	1	1	1
Goldhill	0.835938	0.976563	1	1	1
Lena	0.734375	0.960938	1	1	1
Peppers	0.554688	0.882813	0.960938	1	1

6.3.2 เปรียบเทียบผลการทดสอบของภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำที่อัตราบิต 0.8 bpp

ในการทดสอบจะใช้ค่าพารามิเตอร์เหมือนกับการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับฝังลายน้ำในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่อัตราบิต 0.5 bpp แต่แตกต่างกันที่จะทำการเข้ารหัส SPIHT ที่อัตราบิตเท่ากับ 0.8 bpp จากนั้นทำการวัดคุณภาพของภาพและทดสอบความทนทานของสัญญาณลายน้ำของภาพหลังถูกโจมตีด้วยการประมวลผลภาพและการบีบอัดสัญญาณภาพดังตารางที่ 6.17 ถึงตารางที่ 6.26

ตารางที่ 6.17 คุณภาพของภาพวัดโดยใช้ค่า $PSNR$ (dB) ที่อัตราบิต 0.8 bpp

ภาพ	วิธีการที่ใช้ทดสอบ			
	Proposed+DMT		Proposed+DWT	
	ไม่ฝังลายน้ำ	ฝังลายน้ำ	ไม่ฝังลายน้ำ	ฝังลายน้ำ
Baboon	25.2406	25.2106	25.079	25.0496
Barbara	34.4894	34.2165	33.3401	33.1129
Boat	36.8486	36.4798	36.175	35.7453
Goldhill	35.9271	35.6607	35.3009	35.0455
Lena	39.0642	38.3723	38.5442	37.9818
Peppers	37.2874	36.9957	37.1466	36.8545

ตารางที่ 6.18 คุณภาพของภาพวัดโดยใช้ค่า QI ที่อัตราบิต 0.8 bpp

ภาพ	วิธีการที่ใช้ทดสอบ			
	Proposed+DMT		Proposed+DWT	
	ไม่ฝังลายน้ำ	ฝังลายน้ำ	ไม่ฝังลายน้ำ	ฝังลายน้ำ
Baboon	8.12768	8.16448	8.21597	8.23848
Barbara	2.81297	2.92866	3.08506	3.19792
Boat	2.14492	2.26755	2.27816	2.4344
Goldhill	3.9203	4.29158	4.62332	4.69772
Lena	1.71358	1.89096	1.79229	1.94609
Peppers	2.03709	2.18349	2.0618	2.20812



(ก)



(ข)

รูปที่ 6.11 ภาพ “Barbara” หลังการบีบอัดและฝังลายน้ำจากการค้นหาด้วย ATS
ที่อัตราบิต 0.8 bpp โดยใช้ (ก) DMT (ข) DWT



(ก)



(ข)

รูปที่ 6.12 ขนาดผลต่างของภาพต้นแบบกับภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำของภาพ “Barbara”
ที่อัตราบิต 0.8 bpp ปรับคูณด้วย 6 โดยใช้ (ก) DMT (ข) DWT

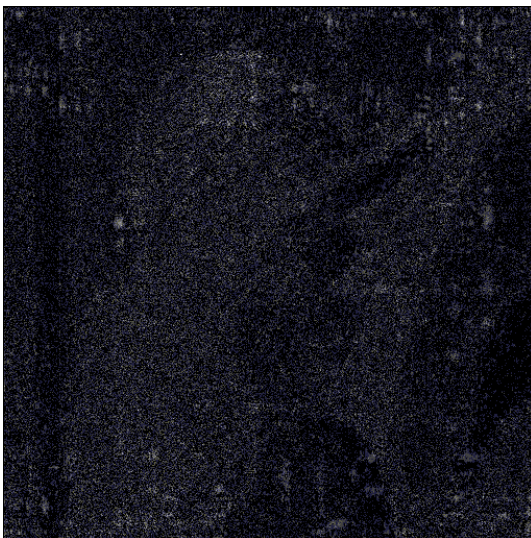


(ก)



(ข)

รูปที่ 6.13 ภาพ “Lena” หลังการบีบอัดและฝังลายน้ำจากการค้นหาด้วย ATS
ที่อัตราบิต 0.8 bpp โดยใช้ (ก) DMT (ข) DWT



(ก)



(ข)

รูปที่ 6.14 ขนาดผลต่างของภาพต้นแบบกับภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำของภาพ “Lena”
ที่อัตราบิต 0.8 bpp ปรับคูณด้วย 11 โดยใช้ (ก) DMT (ข) DWT

ตารางที่ 6.19 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DMT ที่อัตราบิต 0.8 bpp หลังการถูกโจมตีด้วย
การกรองแบบค่านัยฐาน

ภาพ	ขนาดของตัวกรอง			
	3×3	5×5	7×7	9×9
Baboon	0.914063	0.820313	0.578125	0.359375
Barbara	0.984375	0.882813	0.765625	0.632813
Boat	1	0.632813	0.476563	0.3125
Goldhill	0.976563	0.703125	0.414063	0.28125
Lena	1	0.953125	0.898438	0.742188
Peppers	0.984375	0.757813	0.570313	0.398438

ตารางที่ 6.20 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DWT ที่อัตราบิต 0.8 bpp หลังการถูกโจมตีด้วย
การกรองแบบค่านัยฐาน

ภาพ	ขนาดของตัวกรอง			
	3×3	5×5	7×7	9×9
Baboon	0.96875	0.851563	0.671875	0.515625
Barbara	0.992188	0.859375	0.742188	0.578125
Boat	1	0.859375	0.609375	0.390625
Goldhill	0.984375	0.734375	0.4375	0.28125
Lena	0.992188	0.914063	0.84375	0.679688
Peppers	0.976563	0.828125	0.632813	0.453125

ตารางที่ 6.21 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DMT ที่อัตราบิต 0.8 bpp หลังการถูกโจมตีด้วย
การกรองแบบต่ำผ่าน

ภาพ	ขนาดของตัวกรอง			
	3×3	5×5	7×7	9×9
Baboon	1	0.914063	0.703125	0.5625
Barbara	1	0.976563	0.835938	0.710938
Boat	1	0.867188	0.671875	0.515625
Goldhill	0.976563	0.804688	0.5625	0.367188
Lena	1	0.992188	0.851563	0.671875
Peppers	0.992188	0.804688	0.554688	0.34375

ตารางที่ 6.22 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DWT ที่อัตราบิต 0.8 bpp หลังการถูกโจมตีด้วย
การกรองแบบต่ำผ่าน

ภาพ	ขนาดของตัวกรอง			
	3×3	5×5	7×7	9×9
Baboon	1	0.921875	0.765625	0.601563
Barbara	1	0.96875	0.78125	0.648438
Boat	1	0.96875	0.742188	0.59375
Goldhill	0.96875	0.796875	0.796875	0.335938
Lena	1	0.960938	0.835938	0.539063
Peppers	1	0.679688	0.515625	0.328125

ตารางที่ 6.23 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DMT ที่อัตราบิต 0.8 bpp หลังการถูกโจมตีด้วย
การเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน

ภาพ	ค่าความแปรปรวน				
	100	200	300	400	500
Baboon	0.882813	0.851563	0.796875	0.6875	0.625
Barbara	0.992188	0.9375	0.898438	0.78125	0.679688
Boat	0.9375	0.859375	0.75	0.632813	0.632813
Goldhill	0.703125	0.5	0.421875	0.398438	0.34375
Lena	0.976563	0.875	0.78125	0.640625	0.625
Peppers	0.65625	0.492188	0.40625	0.351563	0.320313

ตารางที่ 6.24 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DWT ที่อัตราบิต 0.8 bpp หลังการถูกโจมตีด้วย
การเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน

ภาพ	ค่าความแปรปรวน				
	100	200	300	400	500
Baboon	0.875	0.828125	0.773438	0.6875	0.609375
Barbara	1	0.9375	0.828125	0.742188	0.632813
Boat	0.976563	0.921875	0.796875	0.789063	0.703125
Goldhill	0.640625	0.429688	0.398438	0.351563	0.28125
Lena	1	0.875	0.78125	0.671875	0.632813
Peppers	0.710938	0.53125	0.5	0.445313	0.421875

ตารางที่ 6.25 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DMT ที่อัตราบิต 0.8 bpp หลังการถูกโจมตีด้วย การบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG

ภาพ	Q.F.(%)				
	10	20	30	40	50
Baboon	0.765625	1	1	1	1
Barbara	0.84375	0.992188	1	1	1
Boat	0.609375	0.945313	1	1	1
Goldhill	0.515625	0.875	0.96875	1	1
Lena	0.828125	0.960938	1	1	1
Peppers	0.46875	0.46875	0.929688	0.96875	1

ตารางที่ 6.26 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DWT ที่อัตราบิต 0.8 bpp หลังการถูกโจมตีด้วย การบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG

ภาพ	Q.F.(%)				
	10	20	30	40	50
Baboon	0.828125	1	1	1	1
Barbara	0.828125	0.992188	1	1	1
Boat	0.710938	0.984375	1	1	1
Goldhill	0.421875	0.867188	0.945313	1	1
Lena	0.59375	0.960938	1	1	1
Peppers	0.539063	0.84375	0.984375	1	1

จากผลการทดสอบที่ผ่านมาเป็นการเปรียบเทียบผลของการแปลงสัญญาณภาพต่อ อัลกอริทึมที่นำเสนอ ซึ่งประกอบไปด้วย การแปลงเวฟเลตและการแปลงมัลติเวฟเลตที่อัตราบิต เท่ากับ 0.5 และ 0.8 bpp โดยใช้พารามิเตอร์ของการฝังลายน้ำที่ได้จากการค้นหาด้วย ATS นอกจากนี้ยังได้มีการทดสอบโดยใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหาด้วย GA ซึ่งสามารถดูได้ใน ภาคผนวก ง.

6.4 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอผลการทดสอบของอัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับฟังลายน้ำที่ได้นำเสนอ ในการทดสอบทำการเข้ารหัสที่อัตราบิต 0.3 bpp และ 1.0 bpp จากนั้นนำภาพที่ถูกบีบอัดพร้อมกับฟังลายน้ำไปวัดประสิทธิภาพโดยการพิจารณาถึงคุณภาพของภาพและความทนทานของสัญญาณลายน้ำ ในการวัดคุณภาพจะใช้ค่า *PSNR* และค่า *QI* สำหรับความทนทานของลายน้ำใช้ค่า *NC* ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่า คุณภาพของภาพหลังการบีบอัดและฟังลายน้ำลดลงจากการไม่ฟังลายน้ำน้อยมากโดยไม่ขึ้นกับอัตราการบีบอัดและคุณภาพของภาพที่ใช้พารามิเตอร์จากการค้นหาด้วย *ATS* และ *GA* มีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อนำภาพที่ถูกบีบอัดและฟังลายน้ำไปทดสอบความทนทานของสัญญาณลายน้ำพบว่า สัญญาณลายน้ำมีความทนทานต่อการถูกโจมตีด้วยการกรอแบบค่ามัธยฐานและการกรอแบบค่าผ่านได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังได้เปรียบเทียบผลของการแปลงสัญญาณภาพต่ออัลกอริทึมที่ได้นำเสนอที่อัตราบิต 0.5 bpp และ 0.8 bpp ซึ่งจะเห็นว่าคุณภาพของภาพหลังการฟังลายน้ำของอัลกอริทึมที่ใช้การแปลงมัลติเวฟเลตให้คุณภาพดีกว่าการใช้การแปลงเวฟเลต และสัญญาณลายน้ำของอัลกอริทึมที่ใช้การแปลงมัลติเวฟเลตมีความทนทานต่อการถูกโจมตีด้วยการกรอแบบค่ามัธยฐานและการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ *JPEG* ดีกว่าการใช้การแปลงเวฟเลต

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ศึกษาเกี่ยวกับการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำ เพื่อทำให้ข้อมูลมีขนาดเล็กลงและยังช่วยในการป้องกันการละเมิดลิขสิทธิ์ สำหรับการบีบอัดสัญญาณภาพ ใช้การเข้ารหัส SPIHT และแยกองค์ประกอบของสัญญาณภาพโดยใช้การแปลงมัลติเวฟเลต ซึ่งในการศึกษาวิจัยในวิทยานิพนธ์สามารถสรุปได้ดังนี้

1) ผลของการแปลงสัญญาณภาพต่ออัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณภาพและการฝังลายน้ำ ประกอบด้วย การแปลงเวฟเลตและการแปลงมัลติเวฟเลต ซึ่งเป็นการแปลงที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ในการทดสอบใช้อัลกอริทึมการฝังลายน้ำในโดเมนการบีบอัดโดยการเข้ารหัส SPIHT สำหรับการแยกองค์ประกอบเวฟเลตใช้ Daubechies-4 และการแยกองค์ประกอบมัลติเวฟเลตใช้ DGHM มัลติเวฟเลต ทั้งนี้เนื่องจากการประมาณค่าอันดับ 2 เหมือนกัน จากการทดสอบกับภาพทดสอบพบว่า อัลกอริทึมที่ใช้การแปลงมัลติเวฟเลตให้คุณภาพของภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำดีกว่าอัลกอริทึมที่ใช้การแปลงเวฟเลตที่อัตราบิตเดียวกัน นอกจากนี้เมื่อทำการโจมตีภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำด้วยการประมวลผลภาพและการบีบอัดสัญญาณภาพ พบว่าสัญญาณลายน้ำของอัลกอริทึมที่ใช้การแปลงมัลติเวฟเลตมีความทนทานต่อการถูกโจมตีด้วยการกรอแบบค่ามัธยฐาน การกรอแบบต่ำผ่านและการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG ได้ดีกว่าอัลกอริทึมที่ใช้การแปลงเวฟเลต

2) การค้นหาพารามิเตอร์ของการฝังลายน้ำด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ เนื่องจากความต้องการพื้นฐานของการบีบอัดสัญญาณภาพและการฝังลายน้ำที่ต้องการให้ภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำมีความผิดเพี้ยนไปจากภาพต้นแบบน้อยที่สุด และยังต้องการให้สัญญาณลายน้ำมีความทนทานต่อถูกโจมตีอีกด้วย ซึ่งความต้องการทั้งสองนี้มีความขัดแย้งกัน ทำให้จะต้องหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อหาจุดสมดุลของความต้องการโดยการกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการค้นหา ในงานวิจัยสามารถประยุกต์ใช้ ATS และ GA ในการค้นหาค่า α_1 , α_2 และ T'_w ของอัลกอริทึมที่ใช้การแปลงมัลติเวฟเลตและการแปลงเวฟเลตของภาพทดสอบที่อัตราบิตต่าง ๆ ผลของการค้นหาพารามิเตอร์ของการฝังลายน้ำด้วย ATS และ GA ของอัลกอริทึมที่ใช้การแปลง

มัลติเวฟเล็ดและการแปลงเวฟเล็ดจะมีค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่ำสุดเท่ากันที่อัตราบิตต่ำและแตกต่างกันเล็กน้อยสำหรับการค้นหาที่อัตราบิตสูง

3) คุณภาพของภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำ อัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำที่นำเสนอโดยใช้พารามิเตอร์จากการค้นหาด้วย ATS และ GA ให้คุณภาพของภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำที่ดี เมื่อพิจารณาจากคุณภาพของภาพหลังการบีบอัดแต่ไม่ฝังลายน้ำกับภาพหลังการบีบอัดพร้อมกับฝังลายน้ำจะแตกต่างกันไม่มากนัก นั่นคือกระบวนการของการฝังลายน้ำส่งผลต่อคุณภาพของภาพน้อยมากที่อัตราบิต 0.3 bpp และเมื่อทำการเข้ารหัสที่อัตราบิต 1.0 bpp คุณภาพของภาพหลังการบีบอัดพร้อมกับฝังลายน้ำจะมีความแตกต่างกับภาพหลังการบีบอัดแต่ไม่ฝังลายน้ำเพิ่มมากขึ้น สำหรับการหาพารามิเตอร์จากการค้นหาด้วย ATS และ GA ให้คุณภาพที่ไม่แตกต่างกัน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงคุณภาพของภาพทดสอบแต่ละภาพที่อัตราบิตเดียวกันจะมีคุณภาพที่ไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับลักษณะของภาพ กล่าวคือภาพที่มีความถี่ต่ำมากจะสามารถเข้ารหัสได้ดีกว่าภาพที่มีความถี่สูงมากหรือมีส่วนของลายเส้นมากนั่นเอง

4) ความทนทานของสัญญาณลายน้ำ ในการทดสอบความทนทานของสัญญาณลายน้ำจะทำการโจมตีด้วยการประมวลผลภาพและการบีบอัดสัญญาณภาพพบว่า สัญญาณลายน้ำของอัลกอริทึมที่นำเสนอมีความทนทานต่อการถูกโจมตีด้วยการกรองแบบค่ามัธยฐาน การกรองแบบต่ำผ่านที่ขนาดตัวกรองเท่ากับ 3×3 ได้เป็นอย่างดี แต่สำหรับการโจมตีด้วยการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน สัญญาณลายน้ำที่ได้จะมีความเสียหายค่อนข้างมาก นอกจากนี้เมื่อทำการโจมตีด้วยการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG จะสามารถคัดแยกสัญญาณลายน้ำได้ทั้งหมดที่ค่า $Q.F. = 20$ ยกเว้นภาพ “Lena” และ “Peppers” ที่อัตราบิต 0.3 bpp และเมื่อเข้ารหัสที่อัตราบิตสูงขึ้นไปจะเห็นว่า ความทนทานของสัญญาณลายน้ำลดลงต่ำกว่าที่อัตราบิตต่ำ

5) เปรียบเทียบผลการแปลงสัญญาณภาพด้วยการแปลงมัลติเวฟเล็ดและการแปลงเวฟเล็ดต่ออัลกอริทึมที่นำเสนอ โดยพิจารณาจากความทนทานของสัญญาณลายน้ำและคุณภาพของภาพหลังการบีบอัดพร้อมกับการฝังลายน้ำพบว่า คุณภาพของภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำของอัลกอริทึมที่นำเสนอโดยใช้การแปลงมัลติเวฟเล็ดมีคุณภาพดีกว่าการใช้การแปลงเวฟเล็ดในทุกภาพทดสอบซึ่งวัดโดยใช้ค่า $PSNR$ และเมื่อวัดด้วยค่า QI คุณภาพของภาพที่ใช้การแปลงมัลติเวฟเล็ดยังดีกว่าการใช้การแปลงเวฟเล็ดยกเว้นภาพ “Goldhill” นอกจากนี้เมื่อโจมตีสัญญาณลายน้ำของอัลกอริทึมที่ใช้การแปลงทั้งสองวิธีที่อัตราบิต 0.5 bpp สัญญาณลายน้ำหลังถูกโจมตีด้วยการกรองแบบค่ามัธยฐานและการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG ของอัลกอริทึมที่ใช้การแปลงมัลติเวฟเล็ดมีความทนทานดีกว่าการใช้การแปลงเวฟเล็ด แต่สัญญาณลายน้ำของภาพ “Goldhill” ที่ใช้การแปลงเวฟเล็ดมีความทนทานดีกว่าการใช้การแปลงมัลติเวฟเล็ด

7.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่นำเสนอเป็นการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำของภาพระดับเทา แต่ภาพที่ใช้งานทั่วไปจะเป็นภาพสีซึ่งจากโครงสร้างของภาพสีสามารถที่จะนำอัลกอริทึมที่นำเสนอไปใช้ได้
- 2) ศึกษาเพิ่มเติมวิธีการบีบอัดและฝังลายน้ำของภาพเคลื่อนไหว เพื่อนำอัลกอริทึมที่นำเสนอไปใช้กับภาพเคลื่อนไหวได้
- 3) นำอัลกอริทึมที่นำเสนอไปพัฒนาเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้จริงหรือทำเป็นเว็บเซอร์วิสเพื่อให้ใช้งานผ่านทางระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ต

รายการอ้างอิง

- Areerak, K-N. and Sujitjorn, S. (2002). Performance comparison between genetic algorithm and tabu search methods. **Suranaree J. Sci. Technol.** 9: 61-68.
- Artameeyanant, P. (2006). Tabu searching for watermarking robust against compression and cropping. **SICE-ICASE International Joint Conference.** 4461-4463.
- Attakitmongkol, K., Hardin, D. P., and Wilkes, D. M. (2001). Multiwavelet Prefilters II: Optimal Orthogonal Prefilters. **IEEE Trans. on Image Processing.** 10:1476-1487.
- Bovik, A. C. (2005). **Handbook of image and video processing.** USA: Elsevier Academic Press. 661-672.
- Cox, I. J., Kilian, J., Leighton, F. T. and Shamoon, T. (1997). Secure spread spectrum watermarking for multimedia. **IEEE Transactions on Image Processing.** 6: 1673-1687.
- Elshafie, D. R., Kharma, N. and Ward, R. (2008). Parameter optimization of an embedded watermark using a genetic algorithm. **3rd International Symposium on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP 2008).** 1263-1267.
- Fisher, Y. (1995). **Fractal image compression: theory and application.** USA: Springer-Verlag. 2-23.
- Gonzalez, R. C. and Woods, R. E. (1992). **Digital image processing.** USA: Addison-Wesley. 307-412.
- Grosbois, R., and Ebrahimi, T. (2001). Watermarking in the JPEG 2000 domain. **IEEE Fourth Workshop on Multimedia Signal Processing.** 339-344.
- He, Y., Qiu, Y., Liu, G. and Lei, K. (2005). Optimizing weights of neural network using an adaptive tabu search approach. **Springer-Verlag Berlin Heidelberg.** 672-676.
- Huo, F. and Gao, X. (2006). A wavelet based image watermarking scheme. **IEEE International Conference on Image Processing.** 2573-2576.
- Inoue, H., Miyazaki, A., Yamamoto, A., and Katsura, T. (1998). A digital watermark based on the wavelet transform and its robustness on image compression. **IEEE Int. Conf. Image Processing.** 2: 391-395.

- Jafri, S. A. R. and Baqai, S. (2007). Robust digital watermarking for wavelet-based compression. **IEEE 9th Workshop on Multimedia Signal Processing**. 377-380.
- Kaewkamnerd, N. and Rao, K. R. (2000). Wavelet based image adaptive watermarking scheme. **IEE Electronics Letters**. 36: 312-313.
- Keinert, F. (2004). **Wavelets and multiwavelets: studies in advanced mathematics**. USA: Chapman & Hall/CRC. 121-176.
- Ketcham, M. and Vongprahip, S. (2007). An algorithm for intelligent audio watermarking using genetic algorithm. **IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2007)**. 4454-4461.
- Khelifi, F., Bouridane, A., and Kurugollu, F. (2006). A robust blind image watermarking scheme in the SPIHT-compressed bit stream. **13th IEEE international Conference on Electronics, Circuits and Systems**. 451-454.
- Kumsawat, P., Attakitmongcol, K. and Srikaew, A. (2004). Multiwavelet-based image watermarking using genetic algorithm. **IEEE Region 10 Conference TENCN 2004**. 1: 275-278.
- Kurdar, D. and Hatzinakos, D. (1998). Digital watermarking using multiresolution wavelet decomposition. **IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing**. 5: 2969-2972.
- Kurugollu, F., Bouridane, A., Roula, M. A. and Boussakta, S. (2003). Comparison of different wavelet transforms for fusion based watermarking applications. **Proced. of the 2003 10th IEEE Int. Conf. on Electronics, Circuits and Systems (ICECS 2003)**. 3: 1188-1191.
- Li, K., and Zhang, X. -P. (2003). An image watermarking method integrating with JPEG-2000 still image compression standard. **Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering**. 3: 2051-2054.
- Li, K., and Zhang, X. -P. (2003). Reliable adaptive watermarking scheme integrated with JPEG2000. **Proceeding of the 3rd International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis**. 1: 117-122.
- Negnevitsky, M. (2002). **Artificial intelligence: A guide to intelligent systems**. Great Britain: Addison-Wesley. 217-252.

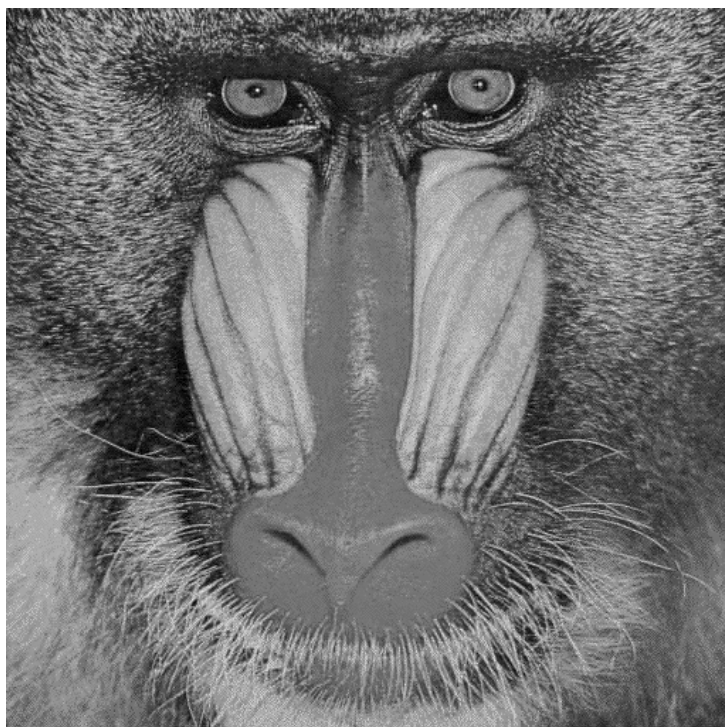
- Pan, J.-S., Cheng, C.-S., Liao, B.-Y., Hsu, C.-H. and Huang, K.-C. (2004). Optimization of multi-purpose watermarking algorithm. **IEEE Asia-Pacific Conference on Circuits and Systems**. 601-604.
- Said, A., and Pearlman, W. A. (1996). A new fast and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees. **IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technology**. 6:243-250.
- Seitz, J. (2005). **Digital watermarking for digital media**. 1st ed. Information Science Publishing, America, p12-16.
- Sendashonga, M. and Labeau, F. (2006). Low complexity image quality assessment using frequency domain transform. **IEEE International Conf. on Image Processing**. 385-388.
- Shapiro, J. M. (1993). Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients. **IEEE Trans. Signal Processing**. 41:3445-3462.
- Srikaew, A. (2002). Genetic algorithms-Part I. **Suranaree J. Sci. Technol**. 9: 69-83.
- Sriyingyong, N. and Attakitmongkol, K. (2006). Wavelet-based audio watermarking using adaptive tabu search. **1st Int. Symposium on Wireless Pervasive Computing**. 1-5.
- Subramanya, S. R. (2001). Image compression technique. **IEEE Potentials**. 20: 19-23.
- Sun, M. (1998). A Tabu search heuristic procedure for solving the transportation problem with exclusionary side constraints. **Journal of Heuristics**. 3: 305-326.
- Tao, P. and Eskicioglu A. M. (2004). A robust multiple watermarking scheme in the discrete wavelet transform domain. **Symposium on Internet Multimedia Management Systems V**.
- Wang, H. -J., and Jay Kuo, C. -C. (1998). An integrated progressive image coding and watermark system. **IEEE international conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing**. 6: 3721-3724.
- Wei, Z., Dai, J. and Li, J. (2006). Genetic watermarking based on DCT domain techniques. **Canadian Conf. on Electrical and Computer Engineering (CCECE' 06)**. 2365-2368.
- Wuttinatenatiruk, C. and Oonsivilai, A. (2003). Harmonic filter design via tabu search application. **Suranaree J. Sci. Technol**. 10: 286-299.
- Ya-fei, S., Li, Z., Guo-wei, W., and Xing-gang, L. (2001). An integrated algorithm with watermarking and compression. **International Conference on Info-tech and Info-net**. 2:797-802.

- Yang, S.-H., Chang, Y.-L., and Chen, H.- C. (2001). A digital watermarking scheme based on SPIHT coding. **IEEE International Conference on Multimedia and Expo**. 325-328.
- Yang, S.-H., and Chen, H.-C. (2002). Bit-plane watermarking for zerotree-coded images. **Asia-Pacific Conference on Circuits and Systems**. 2: 73-78.
- Zhang, Z., Liu, X., and Fan, Z. (2006). The performances analysis of transformation methods in image watermarking using subsampling. **The Sixth Congress on Intelligent Control and Automation**. 2: 9984-9987.
- Zhang, J., Wang, N., and Xiong, F. (2002). Hiding a logo watermark into the multiwavelet domain using neural networks. **Proceeding 14th IEEE international Conference on Tool with Artificial Intelligence**. 477-482.
- Zhong, N., He, Z., Kuang, J. and Zhuo, Z. (2007). An optimal wavelet-based image watermarking via genetic algorithm. **IEEE Third International Conference on Natural Computation (ICNC 2007)**. 3: 103-107.
- Ziv, J. and Lempel, A. (1977). A universal algorithm for sequential data compression. **IEEE Trans. Information Theory**. 337-343.
- Zhu, W., Xiong, Z. and Zhang, Y. -Q. (1999). Multiresolution watermarking for images video. **IEEE Trans. on circuit and system for video technology**. 9: 545-550.

ภาคผนวก ก

ภาพตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

ภาพตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเป็นภาพที่มีนามสกุล RAW ซึ่งเป็นข้อมูลภาพที่ยังไม่ผ่านการบีบอัด ภาพที่ใช้นำมาจาก USC-SIPI Image Database ขนาดของภาพเท่ากับ 512×512 , 8 bpp ประกอบด้วยภาพทั้งหมด 6 ภาพ คือ ภาพ Baboon, Barbara, Boat, Goldhill, Lena และ Peppers แสดงได้ดังรูปที่ ก.1-ก.6



รูปที่ ก.1 ภาพ Baboon



รูปที่ ก.2 ภาพ Barbara



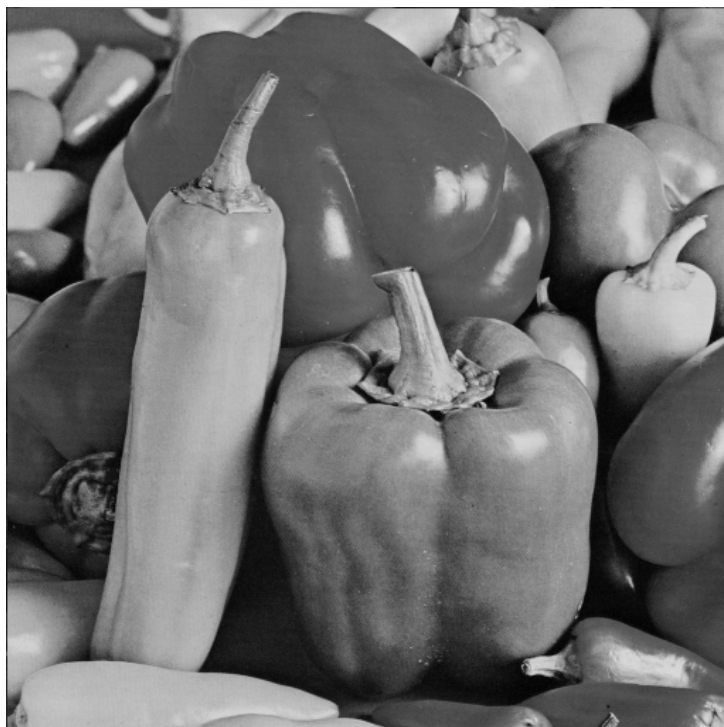
รูปที่ ก.3 ภาพ Boat



รูปที่ ก.4 ภาพ Goldhill



รูปที่ ก.5 ภาพ Lena



รูปที่ ก.6 ภาพ Peppers

ภาคผนวก ข

ค่าพารามิเตอร์ของการฟุ้งสลายน้ำของภาพทดสอบต่าง ๆ ที่ได้จากการค้นหาด้วย
จินเนติกอัลกอริทึมและการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

ค่าพารามิเตอร์ของการฝังลายน้ำที่ได้จากการค้นหา 2 วิธี คือ การค้นหาแบบตามเชิงปรับตัว และจินเนติกอัลกอริทึม ซึ่งพารามิเตอร์ที่ทำการค้นหาประกอบด้วย α_1 , α_2 และ T_w' โดยทำการค้นหาที่อัตราบิดต่าง ๆ สำหรับการโจมตีภาพที่ถูกฝังลายน้ำในกระบวนการค้นหาประกอบด้วย การกรองแบบค่ามัธยฐาน การกรองแบบค่าผ่าน และการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน นอกจากนี้ยังได้ค้นหาพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมที่ใช้การแปลงสัญญาณภาพที่แตกต่างกัน ทั้งการแปลงเวฟเล็ตและการแปลงมัลติเวฟเล็ต ตารางที่ ข.1 และตารางที่ ข.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมที่ใช้การแปลงมัลติเวฟเล็ตจากการค้นหาด้วย ATS และ GA ตามลำดับ ตารางที่ ข.3 และตารางที่ ข.4 แสดงค่าพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมที่ใช้การแปลงเวฟเล็ตจากการค้นหาด้วย ATS และ GA ตามลำดับ โดยที่ f คือ ค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์

การค้นหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมด้วย ATS กำหนดค่าพารามิเตอร์ในการค้นหาดังนี้ จำนวนคำตอบเซตข้างเคียงเท่ากับ 30 เมื่อมีการเดินวนซ้ำอยู่กับที่เกินกว่า 3 รอบ จะทำให้ ATS เข้าสู่กลไกการเดินย้อนรอยโดยเดินย้อนกลับไปในตาบูลิสต์เท่ากับ 5 สำหรับกลไกการปรับรัศมีถ้าค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าน้อยกว่า 2 รัศมีมีค่าเท่ากับ 0.1 ถ้าค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าน้อยกว่า 1 รัศมีมีค่าเท่ากับ 0.05 ถ้าค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าน้อยกว่า 0.5 รัศมีมีค่าเท่ากับ 0.01 และถ้าค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าน้อยกว่า 0.1 รัศมีมีค่าเท่ากับ 0.005 จำนวนรอบการค้นหาสูงสุดเท่ากับ 50 รอบ

การค้นหาค่าพารามิเตอร์ของการฝังลายน้ำด้วย GA กำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ของการค้นหาเป็นดังนี้ จำนวนประชากรเท่ากับ 30 โครโมโซมเข้ารหัสแบบเลขฐานสองโดยจำนวนบิตที่ใช้แทนแต่ละโครโมโซมเท่ากับ 20 บิต ความน่าจะเป็นของการทำครอสโอเวอร์และการผ่าเหล่าเท่ากับ 0.7 และ 0.05 ตามลำดับ การคัดเลือกประชากรใช้การคัดเลือกแบบวงล้อรูเล็ต สำหรับเกณฑ์การหยุด กำหนดให้ทำการค้นหาทั้ง 50 รุ่น

ตารางที่ ข.1 ค่าพารามิเตอร์ของการฝ่งลายน้ำของภาพทดสอบต่าง ๆ โดยใช้การค้นหาคำด้วย ATS และ
การแปลง DMT

ภาพ	อัตราบิต (bpp)	พารามิเตอร์ของการฝ่งลายน้ำ			
		α_1	α_2	T'_w	f
Airplane	0.3	0.319641	0.496674	124.058594	2.200139
	0.5	0.366296	0.013617	141.860931	1.514474
	0.8	0.324066	0.228851	145.881271	1.070610
	1.0	0.299423	0.442175	129.190643	0.955458
Baboon	0.3	0.635223	0.936127	133.562500	5.746681
	0.5	0.122772	0.321265	131.389069	4.753684
	0.8	0.002698	0.447162	125.271881	4.159031
	1.0	0.447968	0.734045	128.407028	3.582641
Barbara	0.3	0.319641	0.496674	124.058594	2.973245
	0.5	0.438904	0.938513	124.895309	2.140258
	0.8	0.387134	0.226727	136.524216	1.520319
	1.0	0.289142	0.491321	132.679688	1.203888
Boat	0.3	0.011780	0.762177	122.429688	2.351989
	0.5	0.144519	0.775775	115.373436	1.688395
	0.8	0.129370	0.286768	130.798431	1.194970
	1.0	0.210114	0.469739	127.620316	1.037434
Goldhill	0.3	0.128387	0.265198	132.812500	4.871824
	0.5	0.187640	0.192444	130.810944	3.428459
	0.8	0.072601	0.429700	121.321877	2.262968
	1.0	0.105573	0.479541	120.890625	2.157858
Lena	0.3	0.318915	0.320026	126.257034	1.678943
	0.5	0.363940	0.475616	130.883591	1.261550
	0.8	0.319641	0.496674	124.058594	1.007906
	1.0	0.238330	0.141620	128.085541	0.878001

ตารางที่ ข.1 ค่าพารามิเตอร์ของการฝ่งลายน้ำของภาพทดสอบต่าง ๆ โดยใช้การค้นหาค้นด้วย ATS และ
การแปลง DMT (ต่อ)

ภาพ	พารามิเตอร์	อัตราบิต (bpp)			
		α_1	α_2	T'_w	f
Peppers	0.3	0.251550	0.045697	138.040619	2.069614
	0.5	0.397772	0.130389	147.074997	1.490886
	0.8	0.233521	0.141449	132.009369	1.208932
	1.0	0.233521	0.141449	132.009369	1.163560
Sailboat	0.3	0.011780	0.762177	122.429688	3.012695
	0.5	0.006165	0.799518	106.317184	2.172827
	0.8	0.444330	0.475446	138.065628	1.761900
	1.0	0.171606	0.431525	128.263275	1.444519
Tiffany	0.3	0.045465	0.258447	120.431252	6.632803
	0.5	0.067389	0.373486	124.579689	6.388298
	0.8	0.105573	0.479541	120.890625	5.072846
	1.0	0.105573	0.479541	120.890625	4.943285
Zelda	0.3	0.023578	0.293579	126.842186	1.748683
	0.5	0.018872	0.491321	118.250000	1.288957
	0.8	0.090872	0.181540	129.946487	0.866581
	1.0	0.090872	0.181540	129.946487	0.819701

ตารางที่ ข.2 ค่าพารามิเตอร์ของการฝ่งลายน้ำของภาพทดสอบต่าง ๆ โดยใช้การค้นหาค้นด้วย GA และ
การแปลง DMT

ภาพ	อัตราบิต (bpp)	พารามิเตอร์ของการฝ่งลายน้ำ			
		α_1	α_2	T'_w	f
Airplane	0.3	0.259049	0.842143	122.942627	2.200139
	0.5	0.433985	0.494074	140.656372	1.514474
	0.8	0.262575	0.105474	142.103760	1.071913
	1.0	0.358606	0.147923	143.659912	0.946213
Baboon	0.3	0.143577	0.708652	132.143066	5.746681
	0.5	0.433983	0.314920	131.308105	4.754986
	0.8	0.259049	0.841897	124.880127	4.159031
	1.0	0.259049	0.842141	126.942627	3.582641
Barbara	0.3	0.259049	0.842143	122.942627	2.973245
	0.5	0.259049	0.842141	126.942627	2.140258
	0.8	0.270287	0.486811	135.447266	1.520319
	1.0	0.332787	0.330255	131.307617	1.203888
Boat	0.3	0.402735	0.314808	121.135620	2.351989
	0.5	0.486649	0.452872	138.505981	1.681688
	0.8	0.370261	0.443594	128.801514	1.196073
	1.0	0.269195	0.496019	132.373535	1.039611
Goldhill	0.3	0.433983	0.314920	131.308105	4.871824
	0.5	0.082021	0.242778	129.137939	3.428459
	0.8	0.029702	0.625261	120.130981	2.322121
	1.0	0.029696	0.658340	119.913818	2.195507
Lena	0.3	0.433983	0.314810	125.135132	1.678943
	0.5	0.262610	0.451632	127.305664	1.261550
	0.8	0.277987	0.451910	127.608398	1.006604
	1.0	0.311159	0.334726	122.077881	0.880471

ตารางที่ ข.2 ค่าพารามิเตอร์ของการฝังลายน้ำของภาพทดสอบต่าง ๆ โดยใช้การค้นหาค้นด้วย GA และการแปลง DMT (ต่อ)

ภาพ	อัตราบิต (bpp)	พารามิเตอร์ของการฝังลายน้ำ			
		α_1	α_2	T'_w	f
Peppers	0.3	0.402735	0.245780	138.018433	2.069614
	0.5	0.210833	0.215794	130.306152	1.494197
	0.8	0.241592	0.211111	132.034180	1.207630
	1.0	0.129983	0.189919	130.038208	1.160956
Sailboat	0.3	0.029702	0.625134	115.459961	3.012695
	0.5	0.061440	0.672025	119.847290	2.178036
	0.8	0.434473	0.361811	135.462891	1.761900
	1.0	0.295783	0.202139	138.354980	1.443982
Tiffany	0.3	0.048665	0.179595	118.847290	6.634105
	0.5	0.048179	0.156642	123.288574	6.388298
	0.8	0.081529	0.463718	117.578491	5.070242
	1.0	0.082026	0.231302	124.236694	4.932967
Zelda	0.3	0.112786	0.196156	121.135620	1.748683
	0.5	0.112786	0.196193	123.288574	1.226483
	0.8	0.112931	0.015379	127.310791	0.856031
	1.0	0.228213	0.258280	131.307617	0.875370

ตารางที่ ข.3 ค่าพารามิเตอร์ของการฝ่งลายน้ำของภาพทดสอบต่าง ๆ โดยใช้การค้นหาคำด้วย ATS และ
การแปลง DWT

ภาพ	อัตราบิต (bpp)	พารามิเตอร์ของการฝ่งลายน้ำ			
		α_1	α_2	T'_w	f
Airplane	0.3	0.482513	0.580322	122.722656	2.397417
	0.5	0.432947	0.277411	131.515625	1.598252
	0.8	0.245624	0.464099	126.160934	1.123826
	1.0	0.160065	0.488406	119.682037	0.993271
Baboon	0.3	0.438959	0.907672	138.342194	5.959208
	0.5	0.071033	0.919293	125.518753	4.807798
	0.8	0.309393	0.334064	125.658592	4.189094
	1.0	0.482513	0.580322	122.722656	3.720210
Barbara	0.3	0.486420	0.062103	120.425781	3.099159
	0.5	0.345856	0.577850	115.867188	2.268375
	0.8	0.425189	0.444067	145.172653	1.661397
	1.0	0.294617	0.405847	136.644531	1.340819
Boat	0.3	0.334473	0.147064	128.023438	2.438311
	0.5	0.300830	0.456641	136.084366	1.766443
	0.8	0.289142	0.491321	132.679688	1.266610
	1.0	0.309979	0.288757	127.531250	1.092936
Goldhill	0.3	0.011780	0.762177	122.429688	4.599283
	0.5	0.034546	0.788397	107.253120	3.214945
	0.8	0.105573	0.479541	120.890625	2.476390
	1.0	0.138593	0.477991	122.995300	2.341935
Lena	0.3	0.467212	0.077118	135.199997	1.749775
	0.5	0.309979	0.288757	127.531250	1.338648
	0.8	0.171606	0.431525	128.263275	1.035546
	1.0	0.187640	0.192444	130.810944	0.918916

ตารางที่ ข.3 ค่าพารามิเตอร์ของการฝังลายน้ำของภาพทดสอบต่าง ๆ โดยใช้การค้นหาค้นหาด้วย ATS และการแปลง DWT (ต่อ)

ภาพ	อัตราบิต (bpp)	พารามิเตอร์ของการฝังลายน้ำ			
		α_1	α_2	T'_w	f
Peppers	0.3	0.106122	0.184216	125.635941	2.377996
	0.5	0.045465	0.258447	120.431252	1.598422
	0.8	0.141632	0.142267	135.612488	1.204319
	1.0	0.200336	0.200049	137.017181	1.143551
Sailboat	0.3	0.334473	0.147064	128.023438	3.220164
	0.5	0.432947	0.277411	131.515625	2.285738
	0.8	0.317920	0.046039	140.142960	1.808289
	1.0	0.459143	0.206744	144.778107	1.505391
Tiffany	0.3	0.067389	0.373486	124.579689	6.622314
	0.5	0.036078	0.199597	129.862518	6.394671
	0.8	0.024286	0.382153	125.843750	5.004590
	1.0	0.105573	0.479541	120.890625	4.950347
Zelda	0.3	0.303601	0.345233	129.764069	1.808170
	0.5	0.181226	0.431866	120.415619	1.267381
	0.8	0.281192	0.096320	147.244141	0.913767
	1.0	0.222949	0.060168	140.194534	0.851609

ตารางที่ ข.4 ค่าพารามิเตอร์ของการฝ่งลายน้ำของภาพทดสอบต่าง ๆ โดยใช้การค้นหาค้นหาด้วย GA และ
การแปลง DWT

ภาพ	อัตราบิต (bpp)	พารามิเตอร์ของการฝ่งลายน้ำ			
		α_1	α_2	T'_w	f
Airplane	0.3	0.259049	0.842143	122.942627	2.397417
	0.5	0.402733	0.245780	138.018433	1.598252
	0.8	0.295699	0.125467	139.513428	1.119252
	1.0	0.272588	0.080348	138.455566	0.989088
Baboon	0.3	0.433983	0.314920	131.308105	5.959208
	0.5	0.048920	0.867002	125.411377	4.807798
	0.8	0.048920	0.867002	125.411377	4.191698
	1.0	0.259049	0.842143	122.942627	3.720210
Barbara	0.3	0.290301	0.838165	121.061035	3.099159
	0.5	0.259049	0.873350	116.090332	2.270979
	0.8	0.259545	0.140497	137.753052	1.662699
	1.0	0.295791	0.455561	135.601074	1.339517
Boat	0.3	0.259049	0.842141	126.942627	2.438311
	0.5	0.496971	0.146839	136.753540	1.766443
	0.8	0.322717	0.475079	128.569580	1.266610
	1.0	0.259356	0.487787	135.221680	1.092936
Goldhill	0.3	0.259049	0.842141	126.942627	4.595376
	0.5	0.060954	0.629031	114.460449	3.217549
	0.8	0.045325	0.330213	115.458496	2.471181
	1.0	0.210831	0.199926	132.368652	2.339095
Lena	0.3	0.378914	0.042699	134.568481	1.749775
	0.5	0.304673	0.450611	128.521729	1.337346
	0.8	0.302721	0.461991	127.250000	1.034444
	1.0	0.293098	0.330545	131.308105	0.909382

ตารางที่ ข.4 ค่าพารามิเตอร์ของการฝังลายน้ำของภาพทดสอบต่าง ๆ โดยใช้การค้นหาค้นด้วย GA และการแปลง DWT (ต่อ)

ภาพ	อัตราบิต (bpp)	พารามิเตอร์ของการฝังลายน้ำ			
		α_1	α_2	T'_w	f
Peppers	0.3	0.016927	0.160515	124.135620	2.377996
	0.5	0.210344	0.361683	125.227417	1.602086
	0.8	0.193254	0.175944	133.140625	1.205622
	1.0	0.241632	0.349439	128.710571	1.143749
Sailboat	0.3	0.048920	0.867002	125.411377	3.220164
	0.5	0.433983	0.314920	131.308105	2.284436
	0.8	0.486649	0.452872	138.505981	1.809591
	1.0	0.449854	0.184076	143.755859	1.505391
Tiffany	0.3	0.048179	0.156642	123.288574	6.622314
	0.5	0.195540	0.234128	129.307861	6.394671
	0.8	0.030192	0.672241	113.849365	5.069931
	1.0	0.030183	0.656702	121.958496	5.005513
Zelda	0.3	0.277475	0.455317	129.925781	1.808170
	0.5	0.183467	0.442999	119.544800	1.268683
	0.8	0.268908	0.109839	139.976074	0.915069
	1.0	0.245469	0.050215	135.564209	0.855515

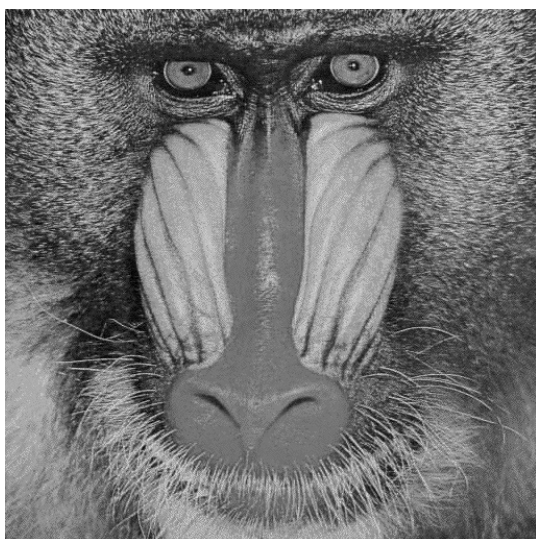
ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบของอัลกอริทึมที่นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์โดยเข้ารหัส
SPIHT ที่อัตราบิตเท่ากับ 1.0 bpp

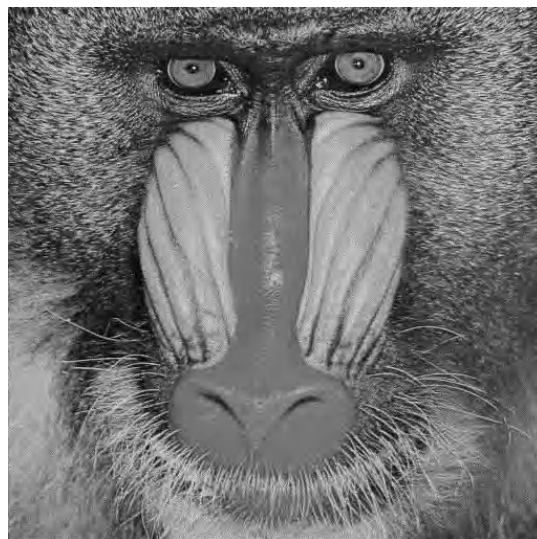
ในการทดสอบใช้การบีบอัดสัญญาณภาพ SPIHT ที่อัตราบิตเท่ากับ 1.0 bpp สำหรับภาพทดสอบทุกภาพ การแยกองค์ประกอบสัญญาณภาพใช้ DGHM มัลติเวฟเลตทั้งหมด 5 ระดับ โดยกำหนดให้ค่าขีดเริ่มเปลี่ยน $T_1 = 64$, $T_2 = 256$ และ $T_w = 128$ พารามิเตอร์ที่ได้จากการสุ่มมีค่าเป็น $\alpha_1 = 0.2$, $\alpha_2 = 0.2$ และ $T'_w = 128$ จะได้คุณภาพของภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำแสดงได้ดังตารางที่ ค.1 และ ค.2 ซึ่งวัดโดยใช้ค่า $PSNR$ และค่า QI ตามลำดับ ตัวอย่างภาพ “Baboon” และ “Peppers” หลังการบีบอัดและฝังลายน้ำแสดงได้ดังรูปที่ ค.1 และรูปที่ ค.2 ตามลำดับ สำหรับการทดสอบความทนทานของสัญญาณลายน้ำหลังการถูกโจมตีซึ่งประกอบด้วย ตารางที่ ค.3 แสดงผลการทดสอบของภาพหลังการโจมตีด้วยการกรองแบบค่ามัธยฐาน ตารางที่ ค.4 แสดงผลการทดสอบของภาพหลังถูกโจมตีด้วยการกรองแบบต่ำผ่าน ตารางที่ ค.5 แสดงผลการทดสอบของภาพหลังถูกโจมตีด้วยการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียนและตารางที่ ค.6 เป็นผลการทดสอบของภาพหลังถูกโจมตีด้วยการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG

ตารางที่ ก.1 คุณภาพของภาพวัดโดยใช้ค่า $PSNR$ (dB) ที่อัตราบิต 1.0 bpp

ภาพ	SPIHT	SPIHT+การฝังลายน้ำ		
		การสุ่มค่า	ATS	GA
Baboon	26.2362	26.2113	26.1591	26.1591
Barbara	36.7360	36.4758	36.2880	36.2880
Boat	38.5034	38.1242	37.9747	37.8214
Goldhill	37.3675	37.0724	36.9995	36.8123
Lena	40.5466	39.9253	39.9253	39.7302
Peppers	38.2677	37.9074	37.9074	37.9074



(ก)

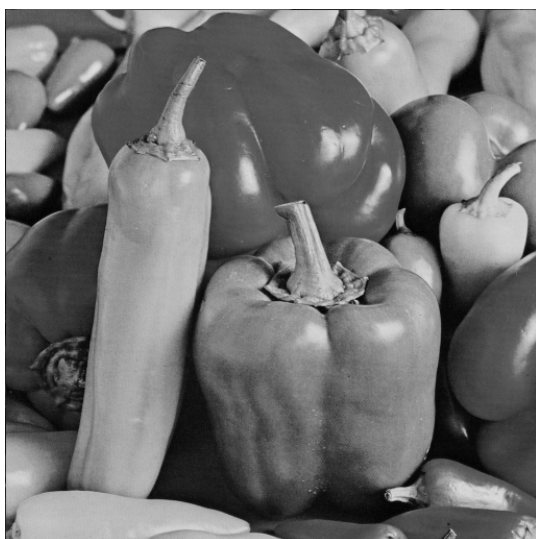


(ข)

รูปที่ ก.1 (ก) ภาพต้นแบบ (ข) ภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำที่อัตราบิต 1.0 bpp

ตารางที่ ค.2 คุณภาพของภาพวัดโดยใช้ค่า QI ที่อัตราบิต 1.0 bpp

ภาพ	SPIHT	SPIHT+การฝังลายน้ำ		
		การสุ่มค่า	ATS	GA
Baboon	7.01616	7.04670	7.09572	7.09572
Barbara	2.15437	2.24227	2.30621	2.30621
Boat	1.8017	1.90651	1.94736	1.99077
Goldhill	3.66669	4.34647	4.06069	4.15683
Lena	1.44234	1.57906	1.57906	1.62307
Peppers	1.95014	2.09275	2.09275	2.09275



(ก)



(ข)

รูปที่ ค.2 (ก) ภาพต้นแบบ (ข) ภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำที่อัตราบิต 1.0 bpp

ตารางที่ ค.3 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำที่อัตราบิต 1.0 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการกรองแบบ
ค่ามาตรฐาน

ภาพ	พารามิเตอร์ของ การฝังลายน้ำ	ขนาดของตัวกรอง			
		3×3	5×5	7×7	9×9
Baboon	Proposed	0.71875	0.414063	0.28125	0.195313
	ATS	0.992188	0.953125	0.71875	0.562500
	GA	0.992188	0.945313	0.71875	0.554688
Barbara	Proposed	0.882813	0.671875	0.570313	0.460938
	ATS	0.976563	0.851563	0.734375	0.679688
	GA	0.976563	0.859375	0.75	0.6875
Boat	Proposed	0.921875	0.625	0.375	0.296875
	ATS	1	0.765625	0.484375	0.328125
	GA	1	0.882813	0.65625	0.4375
Goldhill	Proposed	0.945313	0.726563	0.429688	0.257813
	ATS	0.960938	0.703125	0.4375	0.296875
	GA	0.953125	0.796875	0.546875	0.398438
Lena	Proposed	0.984375	0.945313	0.773438	0.617188
	ATS	0.984375	0.945313	0.773438	0.617188
	GA	0.992188	0.945313	0.867188	0.726563
Peppers	Proposed	0.976563	0.773438	0.539063	0.429688
	ATS	0.992188	0.773438	0.578125	0.406250
	GA	0.984375	0.757813	0.546875	0.414063

ตารางที่ ค.4 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำที่อัตราบิต 1.0 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการกรองแบบต่ำผ่าน

ภาพ	พารามิเตอร์ของการฝังลายน้ำ	ขนาดของตัวกรอง			
		3×3	5×5	7×7	9×9
Baboon	Proposed	0.992188	0.710938	0.453125	0.296875
	ATS	1	0.976563	0.789063	0.648438
	GA	1	0.992188	0.804688	0.65625
Barbara	Proposed	1	0.914063	0.726563	0.492188
	ATS	1	0.96875	0.828125	0.695313
	GA	1	0.96875	0.835938	0.695313
Boat	Proposed	1	0.859375	0.671875	0.492188
	ATS	1	0.890625	0.71875	0.570313
	GA	1	0.976563	0.8125	0.648438
Goldhill	Proposed	0.984375	0.898438	0.671875	0.421875
	ATS	0.976563	0.820313	0.578125	0.382813
	GA	0.96875	0.84375	0.617188	0.414063
Lena	Proposed	1	0.960938	0.726563	0.484375
	ATS	1	0.960938	0.726563	0.484375
	GA	1	0.992188	0.828125	0.65625
Peppers	Proposed	1	0.78125	0.578125	0.375
	ATS	0.992188	0.804688	0.546875	0.335938
	GA	1	0.773438	0.554688	0.375

ตารางที่ ค.5 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำที่อัตราบิต 1.0 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน

ภาพ	พารามิเตอร์ ของการฝัง ลายน้ำ	ค่าความแปรปรวน				
		100	200	300	400	500
Baboon	Proposed	0.828125	0.617188	0.476563	0.429688	0.3125
	ATS	0.953125	0.921875	0.890625	0.835938	0.78125
	GA	0.953125	0.921875	0.882813	0.835938	0.757813
Barbara	Proposed	0.828125	0.695313	0.617188	0.484375	0.40625
	ATS	1	0.96875	0.898438	0.8125	0.71875
	GA	1	0.96875	0.914063	0.8125	0.703125
Boat	Proposed	0.765625	0.648438	0.554688	0.421875	0.421875
	ATS	0.945313	0.859375	0.734375	0.648438	0.617188
	GA	0.960938	0.898438	0.828125	0.757813	0.726563
Goldhill	Proposed	0.617188	0.445313	0.4375	0.367188	0.296875
	ATS	0.695313	0.5	0.382813	0.390625	0.296875
	GA	0.742188	0.578125	0.507813	0.4375	0.359375
Lena	Proposed	0.867188	0.71875	0.59375	0.5	0.484375
	ATS	0.867188	0.71875	0.59375	0.5	0.484375
	GA	0.914063	0.804688	0.6875	0.617188	0.601563
Peppers	Proposed	0.585938	0.429688	0.359375	0.328125	0.273438
	ATS	0.617188	0.484375	0.359375	0.335938	0.3125
	GA	0.609375	0.414063	0.375	0.320313	0.296875

ตารางที่ ค.6 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำที่อัตราบิต 1.0 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการบีบอัด
สัญญาณภาพแบบ JPEG

ภาพ	พารามิเตอร์ ของการฝัง ลายน้ำ	Q. F. (%)				
		10	20	30	40	50
Baboon	Proposed	0.445313	0.882813	0.976563	0.992188	1
	ATS	0.976563	1	1	1	1
	GA	0.976563	1	1	1	1
Barbara	Proposed	0.515625	0.789063	0.898438	0.929688	0.992188
	ATS	0.773438	0.992188	1	1	1
	GA	0.757813	0.992188	1	1	1
Boat	Proposed	0.429688	0.734375	0.914063	0.960938	0.992188
	ATS	0.632813	0.953125	1	1	1
	GA	0.789063	0.984375	1	1	1
Goldhill	Proposed	0.507813	0.765625	0.921875	0.929688	0.992188
	ATS	0.570313	0.851563	0.96875	1	1
	GA	0.695313	0.945313	0.992188	1	1
Lena	Proposed	0.648438	0.859375	0.953125	0.96875	1
	ATS	0.648438	0.859375	0.953125	0.96875	1
	GA	0.671875	0.898438	0.960938	1	0.992188
Peppers	Proposed	0.453125	0.734375	0.882813	0.914063	0.976563
	ATS	0.453125	0.796875	0.96875	0.992188	0.992188
	GA	0.476563	0.757813	0.929688	0.984375	0.984375

ภาคผนวก ง

เปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างอัลกอริทึมที่ใช้การแปลงมัลติเวฟเล็ตและ
การแปลงเวฟเล็ตโดยใช้การค้นหาลามิเตอร์ด้วย GA
ที่อัตราบิต 0.5 bpp และ 0.8 bpp

การเปรียบเทียบผลการทดสอบจะทำการแปลงมัลติเวฟเล็ตและการแปลงเวฟเล็ตโดยใช้ อัลกอริทึมที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่น่าเสนอ เริ่มจากการนำภาพทดสอบไปแยกองค์ประกอบ สำหรับการแยกองค์ประกอบมัลติเวฟเล็ตใช้ DGHM มัลติเวฟเล็ตและการแยกองค์ประกอบเวฟเล็ต ใช้ Daubechies-4 ในการทดสอบใช้การบีบอัดสัญญาณภาพ SPIHT ที่อัตราบิตเท่ากับ 0.5 bpp และ 0.8 bpp สำหรับภาพทดสอบทุกภาพ ในที่นี้ไม่ใช้การเข้ารหัสเลขคณิต แยกองค์ประกอบ สัญญาณภาพทั้งหมด 5 ระดับ โดยกำหนดให้ $T_1 = 64$, $T_2 = 256$ และ $T_w = 128$ สำหรับการบีบอัด ที่อัตราบิต 0.5 bpp จะได้คุณภาพของภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำแสดงได้ดังตารางที่ ง.1 และ ตารางที่ ง.2 ซึ่งวัดโดยใช้ค่า $PSNR$ และค่า QI ตามลำดับ ในการทดสอบความทนทานของสัญญาณ ลายน้ำหลังการถูกโจมตีซึ่งประกอบด้วย ตารางที่ ง.3 และตารางที่ ง.4 เป็นการเปรียบเทียบผลการ ทดสอบของภาพหลังการโจมตีด้วยการกรองแบบค่ามัธยฐาน ตารางที่ ง.5 และตารางที่ ง.6 เป็นการ เปรียบเทียบผลการทดสอบของภาพหลังถูกโจมตีด้วยการกรองแบบต่ำผ่าน ตารางที่ ง.7 และ ตารางที่ ง.8 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบของภาพหลังถูกโจมตีด้วยการเพิ่มสัญญาณรบกวน แบบเกาส์เซียนและตารางที่ ง.9 และตารางที่ ง.10 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบของภาพหลัง ถูกโจมตีด้วยการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG

ตารางที่ ง.1 คุณภาพของภาพวัดโดยใช้ค่า $PSNR$ (dB) ที่อัตราบิต 0.5 bpp

ภาพ	วิธีการที่ใช้ทดสอบ			
	Proposed+DMT		Proposed+DWT	
	ไม่ฝังลายน้ำ	ฝังลายน้ำ	ไม่ฝังลายน้ำ	ฝังลายน้ำ
Baboon	23.676	23.65	23.515	23.4948
Barbara	31.0573	30.83	30.1706	29.9755
Boat	33.4698	33.23	32.8995	32.692
Goldhill	33.0194	32.90	32.5467	32.2992
Lena	36.5487	36.1403	35.8433	35.4394
Peppers	35.5919	35.3882	35.3982	35.1115

ตารางที่ ง.2 คุณภาพของภาพวัดโดยใช้ค่า QI ที่อัตราบิต 0.5 bpp

ภาพ	วิธีการที่ใช้ทดสอบ			
	Proposed+DMT		Proposed+DWT	
	ไม่ฝังลายน้ำ	ฝังลายน้ำ	ไม่ฝังลายน้ำ	ฝังลายน้ำ
Baboon	9.39868	9.39799	9.46243	9.50716
Barbara	4.09356	4.2348	4.33305	4.47441
Boat	3.16116	3.27483	3.32188	3.42916
Goldhill	6.3451	6.6253	6.15021	6.25611
Lena	2.26142	2.39894	2.43865	2.58615
Peppers	2.62079	2.75141	2.88682	3.05251

ตารางที่ ง.3 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DMT ที่อัตราบิต 0.5 bpp หลังการถูกโจมตีด้วย
การกรองแบบค่ามัธยฐาน

ภาพ	ขนาดของตัวกรอง			
	3×3	5×5	7×7	9×9
Baboon	0.945313	0.835938	0.539063	0.328125
Barbara	1	0.960938	0.867188	0.796875
Boat	1	0.835938	0.65625	0.445313
Goldhill	0.976563	0.726563	0.453125	0.296875
Lena	1	0.96875	0.890625	0.742188
Peppers	0.984375	0.8125	0.570313	0.40625

ตารางที่ ง.4 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DWT ที่อัตราบิต 0.5 bpp หลังการถูกโจมตีด้วย
การกรองแบบค่ามัธยฐาน

ภาพ	ขนาดของตัวกรอง			
	3×3	5×5	7×7	9×9
Baboon	0.96875	0.828125	0.640625	0.539063
Barbara	0.984375	0.945313	0.890625	0.796875
Boat	0.992188	0.84375	0.625	0.398438
Goldhill	1	0.960938	0.71875	0.53125
Lena	1	0.960938	0.859375	0.773438
Peppers	1	0.90625	0.726563	0.609375

ตารางที่ ๓.5 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DMT ที่อัตราบิต 0.5 bpp หลังการถูกโจมตีด้วย
การกรองแบบต่ำผ่าน

ภาพ	ขนาดของตัวกรอง			
	3×3	5×5	7×7	9×9
Baboon	1	0.851563	0.65625	0.445313
Barbara	1	1	0.890625	0.773438
Boat	1	0.976563	0.804688	0.648438
Goldhill	0.992188	0.796875	0.546875	0.328125
Lena	1	0.976563	0.820313	0.632813
Peppers	1	0.789063	0.5625	0.375

ตารางที่ ๓.6 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DWT ที่อัตราบิต 0.5 bpp หลังการถูกโจมตีด้วย
การกรองแบบต่ำผ่าน

ภาพ	ขนาดของตัวกรอง			
	3×3	5×5	7×7	9×9
Baboon	1	0.914063	0.765625	0.609375
Barbara	1	1	0.96875	0.859375
Boat	1	0.960938	0.765625	0.59375
Goldhill	1	0.945313	0.773438	0.632813
Lena	1	0.992188	0.914063	0.742188
Peppers	1	0.875	0.617188	0.484375

ตารางที่ ง.7 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DMT ที่อัตราบิต 0.5 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน

ภาพ	ค่าความแปรปรวน				
	100	200	300	400	500
Baboon	0.921875	0.84375	0.796875	0.71875	0.726563
Barbara	1	0.992188	0.960938	0.929688	0.859375
Boat	0.945313	0.882813	0.835938	0.773438	0.734375
Goldhill	0.695313	0.523438	0.390625	0.351563	0.3125
Lena	0.984375	0.90625	0.789063	0.703125	0.601563
Peppers	0.632813	0.453125	0.375	0.3125	0.304688

ตารางที่ ง.8 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DWT ที่อัตราบิต 0.5 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน

ภาพ	ค่าความแปรปรวน				
	100	200	300	400	500
Baboon	0.914063	0.828125	0.804688	0.726563	0.703125
Barbara	0.992188	0.976563	0.9375	0.875	0.820313
Boat	0.960938	0.882813	0.796875	0.710938	0.695313
Goldhill	0.78125	0.648438	0.554688	0.484375	0.460938
Lena	1	0.929688	0.875	0.796875	0.734375
Peppers	0.765625	0.648438	0.59375	0.523438	0.53125

ตารางที่ ง.9 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DMT ที่อัตราบิต 0.5 bpp หลังการถูกโจมตีด้วย
การบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG

ภาพ	Q.F.(%)				
	10	20	30	40	50
Baboon	0.828125	0.984375	1	1	1
Barbara	0.976563	1	1	1	1
Boat	0.765625	0.984375	1	1	1
Goldhill	0.5	0.859375	0.960938	1	1
Lena	0.820313	0.96875	1	1	1
Peppers	0.492188	0.796875	0.929688	0.96875	0.976563

ตารางที่ ง.10 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DWT ที่อัตราบิต 0.5 bpp หลังการถูกโจมตีด้วย
การบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG

ภาพ	Q.F.(%)				
	10	20	30	40	50
Baboon	0.875	0.992188	1	1	1
Barbara	0.929688	1	1	1	1
Boat	0.710938	0.96875	1	1	1
Goldhill	0.851563	0.992188	1	1	1
Lena	0.742188	0.960938	1	1	1
Peppers	0.726563	0.96875	1	1	1

สำหรับการเข้ารหัส SPIHT ที่อัตราบิตเท่ากับ 0.8 bpp ในการทดสอบจะใช้ค่าพารามิเตอร์เหมือนกับการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับฝังลายน้ำในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่อัตราบิต 0.5 bpp จากนั้นทำการวัดคุณภาพของภาพแสดงได้ดังตารางที่ ง.11 และตารางที่ ง.12 นอกจากนี้ยังได้ทดสอบความทนทานของสัญญาณลายน้ำของภาพหลังถูกโจมตีด้วยการประมวลผลภาพและการบีบอัดสัญญาณภาพดังตารางที่ ง.13 ถึง ตารางที่ ง.20

ตารางที่ ง.11 คุณภาพของภาพวัดโดยใช้ค่า $PSNR$ (dB) ที่อัตราบิต 0.8 bpp

ภาพ	วิธีการที่ใช้ทดสอบ			
	Proposed+DMT		Proposed+DWT	
	ไม่ฝังลายน้ำ	ฝังลายน้ำ	ไม่ฝังลายน้ำ	ฝังลายน้ำ
Baboon	25.2406	25.2106	25.079	25.0496
Barbara	34.4894	34.2165	33.3401	33.1129
Boat	36.8486	36.3643	36.175	35.7453
Goldhill	35.9271	35.5192	35.3009	35.0455
Lena	39.0642	38.3723	38.5442	37.8314
Peppers	37.2874	36.9957	37.1466	36.8545

ตารางที่ ง.12 คุณภาพของภาพวัดโดยใช้ค่า QI ที่อัตราบิต 0.8 bpp

ภาพ	วิธีการที่ใช้ทดสอบ			
	Proposed+DMT		Proposed+DWT	
	ไม่ฝังลายน้ำ	ฝังลายน้ำ	ไม่ฝังลายน้ำ	ฝังลายน้ำ
Baboon	8.12768	8.16448	8.21597	8.23848
Barbara	2.81297	2.92866	3.08506	3.19792
Boat	2.14492	2.30621	2.27816	2.4344
Goldhill	3.9203	4.4177	4.62332	4.69772
Lena	1.71358	1.89096	1.79229	1.98816
Peppers	2.03709	2.18349	2.0618	2.20812

ตารางที่ ง.13 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DMT ที่อัตราบิต 0.8 bpp หลังการถูกโจมตีด้วย
การกรองแบบค่ามัธยฐาน

ภาพ	ขนาดของตัวกรอง			
	3×3	5×5	7×7	9×9
Baboon	0.914063	0.828125	0.578125	0.390625
Barbara	0.984375	0.898438	0.78125	0.640625
Boat	1	0.882813	0.65625	0.445313
Goldhill	0.953125	0.789063	0.53125	0.375
Lena	1	0.96875	0.90625	0.71875
Peppers	0.984375	0.757813	0.570313	0.398438

ตารางที่ ง.14 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DWT ที่อัตราบิต 0.8 bpp หลังการถูกโจมตีด้วย
การกรองแบบค่ามัธยฐาน

ภาพ	ขนาดของตัวกรอง			
	3×3	5×5	7×7	9×9
Baboon	0.96875	0.859375	0.664063	0.507813
Barbara	0.96875	0.898438	0.765625	0.609375
Boat	0.992188	0.84375	0.65625	0.390625
Goldhill	0.96875	0.742188	0.515625	0.328125
Lena	0.992188	0.929688	0.859375	0.757813
Peppers	0.976563	0.820313	0.640625	0.46875

ตารางที่ ง.15 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DMT ที่อัตราบิต 0.8 bpp หลังการถูกโจมตีด้วย
การกรองแบบต่ำผ่าน

ภาพ	ขนาดของตัวกรอง			
	3×3	5×5	7×7	9×9
Baboon	1	0.945313	0.71875	0.570313
Barbara	1	0.976563	0.84375	0.71875
Boat	1	0.976563	0.851563	0.695313
Goldhill	0.976563	0.820313	0.601563	0.398438
Lena	1	0.984375	0.835938	0.617188
Peppers	0.992188	0.804688	0.554688	0.34375

ตารางที่ ง.16 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DWT ที่อัตราบิต 0.8 bpp หลังการถูกโจมตีด้วย
การกรองแบบต่ำผ่าน

ภาพ	ขนาดของตัวกรอง			
	3×3	5×5	7×7	9×9
Baboon	1	0.929688	0.765625	0.609375
Barbara	1	0.976563	0.859375	0.679688
Boat	1	0.960938	0.796875	0.625
Goldhill	0.984375	0.859375	0.546875	0.34375
Lena	1	0.992188	0.898438	0.773438
Peppers	0.992188	0.726563	0.492188	0.320313

ตารางที่ ง.17 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DMT ที่อัตราบิต 0.8 bpp หลังการถูกโจมตีด้วย
การเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน

ภาพ	ค่าความแปรปรวน				
	100	200	300	400	500
Baboon	0.890625	0.851563	0.78125	0.695313	0.617188
Barbara	0.992188	0.929688	0.90625	0.773438	0.664063
Boat	0.960938	0.875	0.8125	0.742188	0.71875
Goldhill	0.726563	0.554688	0.5	0.421875	0.390625
Lena	0.984375	0.914063	0.796875	0.679688	0.632813
Peppers	0.65625	0.492188	0.40625	0.351563	0.320313

ตารางที่ ง.18 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DWT ที่อัตราบิต 0.8 bpp หลังการถูกโจมตีด้วย
การเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน

ภาพ	ค่าความแปรปรวน				
	100	200	300	400	500
Baboon	0.867188	0.828125	0.773438	0.671875	0.601563
Barbara	0.992188	0.929688	0.84375	0.734375	0.648438
Boat	0.976563	0.890625	0.804688	0.75	0.710938
Goldhill	0.617188	0.46875	0.382813	0.328125	0.296875
Lena	0.992188	0.914063	0.875	0.804688	0.75
Peppers	0.710938	0.554688	0.476563	0.453125	0.421875

ตารางที่ ง.19 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DMT ที่อัตราบิต 0.8 bpp หลังการถูกโจมตีด้วย
การบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG

ภาพ	Q.F.(%)				
	10	20	30	40	50
Baboon	0.757813	1	1	1	1
Barbara	0.851563	0.992188	1	1	1
Boat	0.726563	0.984375	1	1	1
Goldhill	0.65625	0.945313	0.984375	1	1
Lena	0.84375	0.976563	1	1	1
Peppers	0.46875	0.796875	0.929688	0.96875	1

ตารางที่ ง.20 ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DWT ที่อัตราบิต 0.8 bpp หลังการถูกโจมตีด้วย
การบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG

ภาพ	Q.F.(%)				
	10	20	30	40	50
Baboon	0.828125	1	1	1	1
Barbara	0.820313	1	1	1	1
Boat	0.65625	0.960938	1	1	1
Goldhill	0.40625	0.914063	0.945313	0.992188	1
Lena	0.75	0.976563	1	1	1
Peppers	0.515625	0.8125	0.96875	1	1

ภาคผนวก จ

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

“ผลการแปลงสัญญาณภาพต่ออัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณภาพและการฝังลายน้ำ”.
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30 (EECON30) ณ โรงแรมเฟลิกซ์ริเวอร์แคว
รีสอร์ท จังหวัดกาญจนบุรี 25-26 ตุลาคม 2550 หน้า 693-696.

ประวัติผู้เขียน

นายทรงพล ดำนิล เกิดเมื่อวันที่ 29 สิงหาคม พ.ศ. 2526 ที่อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนประชาสามัคคี ระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนอุดรธานีพิทยาคม และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) เกียรตินิยมอันดับหนึ่งจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2548 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2549 ซึ่งมีความสนใจทางด้านการบีบอัดสัญญาณภาพดิจิทัล การฝังลายน้ำดิจิทัลและการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ต การแปลงมัลติเวฟเล็ต วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ในการประมวลผลสัญญาณภาพดิจิทัล โดยในระหว่างศึกษาได้ทำงานในตำแหน่งผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ จำนวน 7 รายวิชา เป็นระยะเวลา 2 ปี ได้แก่

- (1) ปฏิบัติการระบบไฟฟ้ากำลัง 1
- (2) ปฏิบัติการระบบไฟฟ้ากำลัง 2
- (3) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 1
- (4) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 2
- (5) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 2
- (6) ปฏิบัติการการแปลงผันพลังงานทางกลไฟฟ้า
- (7) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้ามูลฐาน